И.А. Осинцев

ИЗОЛЯЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ

Учебное пособие

Экспертного совета ФУМО СПО по УГПС 23.00.00 Техника
и технологии наземного транспорта от «24 » января 2020 г. № 21.
Регистрационный номер экспертного заключения
№121 от «24 » января 2020 г.

Москва
2021

УДК 629.423
ББК 39
О-73

Рецензенты : начальник отдела безопасности движения Западно-Сибирской дирекции тяги — структурное подразделение Дирекции тяги — филиала ОАО «РЖД» К.А. Закусилов; преподаватель высшей категории Тайгинского института железнодорожного транспорта — филиала ФГБОУ ВО «Омский государственный университет путей сообщения» В.Н. Лапицкий

Осинцев, И. А.
О-73 Изоляция электрических машин средней мощности : учебное пособие. — М.: ФГБУ ДПО «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2021. — 456 с.
ISBN 978-5-907206-67-0

В учебном пособии изложены требования к изоляции, раскрыты специфические методы оценки свойств материалов и систем изоляции. Кроме того представлены виды электроизоляционных материалов и проводов, конструкция изоляции электрических машин, совместимость электроизоляционных материалов с пропиточными составами. Описана технология изолирования электрических машин, а также приведен контроль и испытания изоляции обмоток и контроль технологических процессов.

Данное пособие предназначено для обучающихся технических школ и вузов по специальности «Машинист электровоза постоянного и переменного тока», «Слесари-электрики по ремонту и обслуживанию тягового подвижного состава», а также может быть полезно студентам техникумов, колледжей и институтов железнодорожного транспорта.

УДК 629.423
ББК 39

ISBN 978-5-907206-67-0

Список сокращений

КЭИ — конструкция электрической изоляции
МКИ — микалентная компаундированная изоляция
МФС — мочевино-формальдегидная (карбамидная) смола
ПУЭ — правила устройства электроустановок
ПЭТФ — полиэтилентерафталатный
т. м. н. — термомеханическое напряжение
ТРИ — термореактивная изоляция
ТЭН — трубчатый электронагреватель
ФФС — феноло-формальдегидная смола
ЭИ — электрическая изоляция
ЭИМ — электроизоляционный материал

Введение

Изоляция любой детали электрической машины должна сохранять высокую надежность в течение всего периода эксплуатации, и к ней предъявляются разносторонние требования, главным из которых является высокая электрическая прочность. В процессе сборки различных деталей электрической машины изоляционный материал приходится неоднократно изгибать, формовать, придавать ему нужную конфигурацию, опрессовывать, добиваясь монолитности слоев изоляции. Во время укладки обмотки в пазы ее изоляция подвергается изгибам, растяжению, иногда ударам и другим механическим воздействиям. Поэтому к изоляционным материалам, применяемым в электрических машинах, помимо высокой электрической прочности, предъявляют также ряд требований, определяемых технологией изготовления изоляции: материал должен легко формоваться и сохранять после формовки приданные ему свойства, не повреждаться при перегибах и растяжениях, при сжатии, опрессовке и укладке в пазы.

В процессе работы машины изоляция подвергается вибрации, большим механическим напряжениям при резких изменениях тока, а кроме того, на изоляцию вращающихся деталей электрической машины действуют центробежные силы. Поэтому второе требование к изоляции электрических машин — ее высокая механическая прочность. С течением времени свойства изоляции ухудшаются. Она высыхает, становится хрупкой, ломкой и теряет механическую и электрическую прочность. Этот процесс называется старением. Процесс старения изоляции ускоряется при ее нагревании. При небольшом нагреве свойства изоляции ухудшаются медленно, но если температура превысит определенный уровень, то этот процесс резко ускоряется. Уровень длительно допускаемой температуры

определяется нагревостойкостью изоляции. Таким образом, чтобы при изготовлении обмоток, укладке их в пазы и во время работы машины изоляция сохраняла достаточную электрическую прочность, она должна быть монолитна, иметь высокую механическую прочность, нагревостойкость, теплопроводность, влагостойкость, а в необходимых случаях также маслостойкость и химостойкость.

Группы изоляционных материалов электрических машин: синтетические; материалы, изготовляемые на основе слюды; стекловолокнистые, т. е. сделанные из стеклянных волокон; и материалы, основой которых служат целлюлоза и хлопчатобумажные волокна. В некоторых конструкциях для изоляции применяются картоны и материалы, получаемые из асбеста, пряжи, ткани, бумаги. Основными материалами для изоляции обмоток машин низкого (до 660 В) напряжения являются синтетические: различные полиэтилентерафталатные (ПЭТФ) пленки типа лавсан, полиамидные бумаги, картоны и др.

1. ТребоВания к изоляции

Основной задачей электроизоляционных материалов является предотвращение утечки электрических зарядов, разделение электрических цепочек или токопроводящих элементов в приборах и различных аппаратах. Для максимально эффективной работы диэлектрики должны соответствовать определенным требованиям. В настоящее время многие электроизоляционные материалы могут использоваться как защита от электромагнитного излучения, по-другому это свойство диэлектрика называется экранированием. По своей природе диэлектрики обладают пассивными и активными свойствами, исходя из которых можно выделить несколько основных требований к электроизоляционным материалам:

- они должны нести малые диэлектрические потери;
- у материалов должна быть большая диэлектрическая проницаемость;
- для использования в различных областях диэлектрикам необходимо обладать достаточной прочностью;
- они должны иметь высокие удельные сопротивления (объемные и поверхностные).

Для нормирования материалов, применяемых в промышленности и производстве, применяют ГОСТ на электроизоляционные материалы. Перечень нормативных документов включает в себя описание методов определения влагостойкости, воспламеняемости, удельного объемного и поверхностного сопротивления, а также тангенса угла диэлектрических потерь и диэлектрической проницаемости при частоте 50 Гц.

Электроизоляционными материалами, или диэлектриками, называют такие материалы, с помощью которых осуществляют изо-

ляцию, т. е. препятствуют утечке электрического тока между какими-либо токопроводящими частями, находящимися под разными электрическими потенциалами.

Диэлектрики имеют очень большое электрическое сопротивление. По химическому составу диэлектрики делят на органические и неорганические. Основным элементом в молекулах всех органических диэлектриков является углерод. В неорганических диэлектриках углерода нет. Наибольшей нагревостойкостью обладают неорганические диэлектрики (слюда, керамика и др.).

По способу получения различают естественные (природные) и синтетические диэлектрики. Синтетические диэлектрики могут быть созданы с заданным комплексом электрических и физико-химических свойств, поэтому они широко применяются в электротехнике.

По строению молекул диэлектрики делят на неполярные (нейтральные) и полярные. Нейтральные диэлектрики состоят из электрически нейтральных атомов и молекул, которые до воздействия на них электрического поля не обладают электрическими свойствами. Нейтральными диэлектриками являются: полиэтилен, фторопласт и др. Среди нейтральных выделяют ионные кристаллические диэлектрики (слюда, кварц и др.), в которых каждая пара ионов составляет электрически нейтральную частицу. Ионы располагаются в узлах кристаллической решетки. Каждый ион находится в колебательном тепловом движении около центра равновесия – узла кристаллической решетки. Полярные, или дипольные, диэлектрики состоят из полярных молекул-диполей. Последние вследствие асимметрии своего строения обладают начальным электрическим моментом еще до воздействия на них силы электрического поля. К полярным диэлектрикам относятся бакелит, поливинилхлорид и др. По сравнению с нейтральными диэлектриками полярные имеют более высокие значения диэлектрической проницаемости, а также немного повышенную проводимость.

По агрегатному состоянию диэлектрики бывают газообразными, жидкими и твердыми. Самой большой является группа твердых диэлектриков. Электрические свойства электроизоляционных материалов оценивают с помощью величин, называемых электрическими характеристиками. К ним относятся: удельное объемное сопротивление, удельное поверхностное сопротивление, диэлектрическая

проницаемость, температурный коэффициент диэлектрической проницаемости, тангенс угла диэлектрических потерь и электрическая прочность материала.

Удельное объемное сопротивление — величина, дающая возможность оценить электрическое сопротивление материала при протекании через него постоянного тока. Величина, обратная удельному объемному сопротивлению, называется удельной объемной проводимостью.

Удельное поверхностное сопротивление — величина, позволяющая оценить электрическое сопротивление материала при протекании постоянного тока по его поверхности между электродами. Величина, обратная удельному поверхностному сопротивлению, называется удельной поверхностной проводимостью.

Температурный коэффициент удельного электрического сопротивления — величина, определяющая изменение удельного сопротивления материала с изменением его температуры. С повышением температуры у всех диэлектриков электрическое сопротивление уменьшается, следовательно, их температурный коэффициент удельного сопротивления имеет отрицательный знак.

Диэлектрическая проницаемость — величина, позволяющая оценить способность материала создавать электрическую емкость. Относительная диэлектрическая проницаемость входит в величину абсолютной диэлектрической проницаемости.

Температурный коэффициент диэлектрической проницаемости — величина, дающая возможность оценить характер изменения диэлектрической проницаемости, а следовательно, и емкости изоляции с изменением температуры. Тангенс угла диэлектрических потерь — величина, определяющая потери мощности в диэлектрике, работающем при переменном напряжении

Электрическая прочность — величина, позволяющая оценить способность диэлектрика противостоять разрушению его электрическим напряжением. Механическая прочность электроизоляционных и других материалов оценивается при помощи следующих характеристик: предел прочности материала при растяжении, относительное удлинение при растяжении, предел прочности материала при сжатии, предел прочности материала при статическом изгибе, удельная ударная вязкость, сопротивление раскалыванию.

К физико-химическим характеристикам диэлектриков относятся: кислотное число, вязкость, водопоглощаемость.

Кислотное число — это количество миллиграммов едкого калия, необходимое для нейтрализации свободных кислот, содержащихся в 1 г диэлектрика. Кислотное число определяется у жидких диэлектриков, компаундов и лаков. Эта величина позволяет оценить количество свободных кислот в диэлектрике, а значит, степень их воздействия на органические материалы. Наличие свободных кислот ухудшает электроизоляционные свойства диэлектриков.

Вязкость, или коэффициент внутреннего трения, дает возможность оценить текучесть электроизоляционных жидкостей (масел, лаков и др.). Вязкость бывает кинематической и условной.

Водопоглощаемость — это количество воды, поглощенной диэлектриком после пребывания его в дистиллированной воде в течение суток при температуре 20 °С и выше. Величина водопоглощаемости указывает на пористость материала и наличие в нем водорастворимых веществ. С увеличением этого показателя электроизоляционные свойства диэлектриков ухудшаются.

К тепловым характеристикам диэлектриков относятся: температура плавления, температура размягчения, температура каплепадения, температура вспышки паров, теплостойкость пластмасс, термоэластичность (теплостойкость) лаков, нагревостойкость, морозостойкость, тропикостойкость.

1.1. Воздействия на изоляцию в процессе изготовления и эксплуатации электрических машин и их влияние на эксплуатационную надежность

Эксплуатационная надежность электрической машины общего назначения определяется в первую очередь рабочей температурой машины и нагревостойкостью применяемых изоляционных материалов (температурным запасом), а также электрической прочностью, влагостойкостью и механической прочностью примененной изоляции и для машин на высокое напряжение (6000 В и выше) — стойкостью изоляции к длительному воздействию электрического поля. В процессе изготовления и работы изоляция подвергается механи-

ческим, температурным и химическим воздействиям, влиянию влаги, поверхностных загрязнений и электрического поля.

Изоляционные материалы, применяемые для изоляции электрических машин, можно разделить на несколько групп: синтетические; материалы, изготовляемые на основе слюды; стекловолокнистые, т. е. сделанные из стеклянных волокон; и материалы, основой которых служат целлюлоза и хлопчатобумажные волокна. В некоторых конструкциях для изоляции применяются картоны и материалы, получаемые из асбеста, пряжи, ткани, бумаги.

Основными материалами для изоляции обмоток машин низкого (до 660 В) напряжения являются синтетические: различные ПЭТФ-пленки типа лавсан, полиамидные бумаги, картоны и др.

Пленки имеют малую толщину (0,05–0,06 мм) и большую электрическую прочность. Их применяют в сочетании с подложками из бумаги или картона, улучшающими механические свойства изоляции. При этом электрическая прочность и нагревостойкость такого композиционного материала, как, например, пленкоэлектрокартон, определяются свойствами самой пленки и подложки.

Для изоляции обмоток высоковольтных электрических машин с номинальным напряжением 3000 В и выше применяют изоляционные материалы на основе слюды. Слюда — минерал. Она встречается в природе в виде кристаллов, которые легко расщепляются на пластинки. Тонкие пластинки — лепестки толщиной менее сотой доли миллиметра называют щепаной слюдой. Склеивая лепестки слюды, получают различные электроизоляционные материалы — миканиты. Для увеличения их механической прочности лепестки слюды в некоторых материалах наклеивают на подложку из бумаги или стеклоткани. Подложки предохраняют слюдяной слой от расслаивания при изгибе материала. В зависимости от сорта слюды, способов изготовления, клеящего лака, наличия или отсутствия подложек различают несколько сортов миканита.

Твердые миканиты изготавливают без подложек, горячим прессованием пластинок слюды с термореактивным связующим. Они применяются для получения плоских, не подвергающихся изгибам изоляционных прокладок и имеют большую механическую прочность. К твердым миканитам относится, например, коллекторный,

из которого изготавливают прокладки для изоляции коллекторных пластин (ламелей) друг от друга.

Формовочные миканиты в отличие от твердых после изготовления сохраняют способность принимать ту или иную форму при прессовании в нагретом состоянии и сохранять ее после охлаждения. Они применяются в основном для изоляции коллекторов (фигурные коллекторные манжеты), различных втулок, каркасов катушек и других фасонных изоляционных деталей. К особой разновидности формовочного миканита относится микафолий — тонкий листовой материал, состоящий из пластинок слюды, наклеенных на подложку из бумаги или стеклоткани (стекломикафолий). Он используется для изготовления твердой гильзовой изоляции обмоток. Микафолий с бумажной подложкой относится к классу нагревостойкости В. Стекломикафолий в зависимости от связующего состава может быть использован в изоляции классов В, F или Н.

ГОСТ 8865 разделяет все электроизоляционные материалы по нагревостойкости на семь классов, обозначаемых латинскими буквами: У, А, Е, В, F, Н и G. Нагревостойкость изоляционных материалов для классов У — 90 °С, А — 115 °С, Е — 120°С, В — 130 °С, F — 150°С, Н — 180 °С, G — более 180 °С. Нагрев электрической машины определяется не только потерями, но и температурой окружающей среды. Поэтому тепловое состояние машины оценивают по превышению температуры ее частей над температурой окружающего воздуха, которая принимается равной 40 °С. ГОСТ 183 устанавливает предельно допустимое превышение температуры обмоток в зависимости от типа машины и класса нагревостойкости их изоляции.

Гибкие миканиты отличаются от твердых и формовочных гибкостью при нормальной температуре, которую сохраняют после нагрева и охлаждения. Они применяются для изоляции различных частей обмоток в пазовой и лобовой частях, прокладок и т. п. Разновидностью гибкого миканита является микалента — ленточный материал из склеенных пластинок слюды с двухсторонней подложкой из микалентной бумаги или стеклоленты (стекломикалента). Толщина микалент 0,13 или 0,17 мм. Их применяют главным образом для изоляции обмоток высоковольтных машин. В зависимости от клеящего состава и материала подложек микаленты относятся к классам нагревостойкости В, F или Н. Микалента поступает свернутой в ро-

лики и упакованной в плотно закрытые жестяные коробки. Вынутая из коробки микалента должна быть сразу же использована, т. к. на воздухе она быстро пересыхает и становится непригодной.

Изготовление материалов на основе щепаной слюды — чрезвычайно трудоемкий процесс и до сих пор не механизированный, т. к. требуется предварительное расщепление кристаллов слюды на пластинки (отсюда название — щепаная слюда), их калибровка и равномерная наклейка по слоям на подложку.

В настоящее время применяют материалы, в которых используются не пластинки слюды, а ее мелкие чешуйки, полученные механическим раздроблением кристаллов. Из чешуек изготавливают слюдинитовую бумагу, которая служит основой для ряда изоляционных материалов, аналогичных миканитам. С помощью связующих материалов и подложек из стеклоткани получают коллекторный и формовочный слюдиниты, гибкие слюдиниты и стеклослюдиниты, слюдинитофолии и стеклослюдинитофолий, слюдинитовые и стеклослюденитовые ленты и другие материалы, вполне заменяющие миканиты. В то же время они намного дешевле и технологичнее, чем изоляционные материалы на основе щепаной слюды. Из более крупных чешуек слюды изготавливают слюдопластовые материалы, аналогичные слюдинитовым, но имеющие более высокие механические свойства (коллекторный, формовочный прокладочный слюдопласт, слюдопластофолий, слюдопластовые ленты и т. п.). Эти материалы не уступают по своим электрическим свойствам соответствующим сортам миканитов, но превосходят их по гибкости, поэтому широко используются в современных изоляционных конструкциях.

Изоляционные материалы, изготовленные из стеклянного волокна, — стеклоленты и стеклоткани, обладают высокой нагревостойкостью и большой прочностью на разрыв, но они не стойки к истиранию и повреждаются при многократных изгибах. Их используют как вспомогательные при изолировании обмоток, а также в качестве подложек для изготовления стекломиканитов и композиционных материалов на основе слюдинитов, например стеклослюдинита. Пропитка лаком повышает их механическую прочность, но снижает нагревостойкость, т. к. сами стекловолокнистые материалы имеют большую нагревостойкость, чем пропитывающие лаки.

Среди стекловолокнистых материалов следует выделить стеклоленты из нетканого стекловолокна, имеющие очень большую прочность на разрыв. Их используют для бандажирования лобовых частей обмоток, расположенных на роторах, вместо ранее применявшейся для этой цели стальной бандажной проволоки.

Из целлюлозы делают различные бумаги и электрокартон, а из хлопчатобумажной пряжи — полотна и ленты. Электрическая прочность этих материалов невелика, но они дешевы, легко изгибаются и имеют сравнительно большую механическую прочность. Их применяют для механической защиты других, менее прочных изоляционных материалов и в качестве прокладок. По нагревостойкости они относятся к классу Y. Пропитка лаком повышает их нагревостойкость до класса А. Пропитанные лаком хлопчатобумажные ткани носят название лакотканей. Раньше их широко применяли в обмотках классов нагревостойкости изоляции А. В изоляции современных машин вместо хлопчатобумажных лент и тканей почти всегда применяют стеклоленты и стеклоткани.

Изоляционные материалы на основе асбеста обладают высокой нагревостойкостью и механической прочностью, но в электрических машинах находят ограниченное применение из-за их низкой теплопроводности и высокой гигроскопичности.

1.1.1. Воздействия в процессе изготовления и монтажа обмотки

Изоляция так же, как и конструкционные материалы, не должна подвергаться механическим напряжениям или деформациям, превышающим предельно допустимые. Критерием при нахождении этих пределов обычно является электрическая прочность, поскольку потеря электрической прочности, кратковременной или длительной, под действием механического напряжения может происходить существенно раньше, чем разрушение материала.

В связи со сложностью определения предельных значений для разных видов нагрузок (изгиб, кручение, сжатие, растяжение) в практике используется предельная величина деформации $e_{кр}$ (обычно изгиба или растяжения), поскольку ее проще установить экспериментально в широком диапазоне температур. Одним из наиболее распространенных способов оценки $e_{кр}$ является определение

«критического прогиба», приводящего к электрическому пробою изоляции.

Для жестких систем изоляции, например слюдотерм, используемых в стержневых обмотках, $e_{кр} = 10 \div 3$. Для изоляции катушечных обмоток при повышенной температуре $e_{кр} = 2 \div 3$ раза больше. Перечислим технологические операции, в процессе которых возможно появление опасных деформаций.

Предельные допустимые отклонения расстояний между наконечниками x и y (рис. 1) определяются из расчета, чтобы вызываемая совмещением наконечников относительная деформация не превышала $e_{кр}$. В катушечной обмотке операция подъема шага для укладки последних катушек и отклонение геометрической формы катушки от чертежной могут привести к значительным изгибам и кручениям в зоне вылета и в пазовой части.

Это определяет особые технологические требования к изоляции — в нагретом состоянии она должна выдерживать (сохранять электрическую прочность) деформации, в несколько раз большие, чем изоляция стержней, сохраняя свою монолитность и адгезию к проводникам.

К основным механическим повреждениям относятся:

а) Хранение и транспортировка. При хранении возможны изгибающие усилия в лобовых частях, такие же нагрузки возможны в пазовой и лобовой частях стержня при неправильной транспортировке.

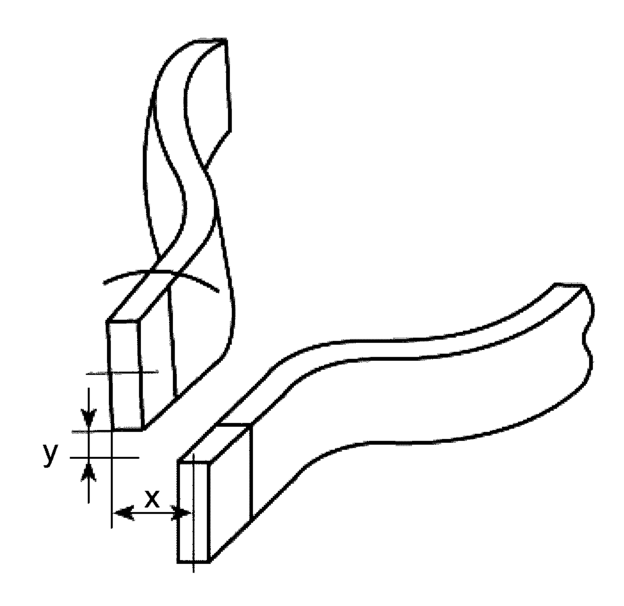


Рис. 1. Расчетное расстояние между наконечниками

б) Укладка обмотки. В стержневой обмотке при соединении наконечников стержней верхнего и нижнего рядов обмотки лобовые части могут подвергаться изгибу и кручению.

в) Заклиновка в пазовой части. Для всех видов обмоток особую опасность представляют сжимающие усилия, действующие на узкие грани стержня (катушки) при его заклиновке. Опыт показал, что такая нагрузка чаще всего приводит к повреждению изоляции верхней (подклиновой) грани, а при неровности сердечника может повреждаться нижняя грань нижнего стержня. Резкое снижение электрической прочности при сжатии стержня начинается при относительно больших нагрузках — около 15 МПа, однако из-за неровности стержней, клиньев и прокладок такие и даже большие напряжения могут возникнуть при гораздо меньшей средней нагрузке.

г) Технологические напряжения. Образование изоляции как элемента в конструкции готового стержня происходит во время полимеризации — отверждения связующего при повышенной температуре $Г_{отв}$ = (140–170 °С). При последующем охлаждении из-за различия коэффициентов расширения меди и изоляции ($a_м$ > $a_и$) в последней возникают сжимающие напряжения, направленные вдоль изоляции

Си = Е   ТГ В □ Г·

1.1.2. Воздействия в процессе эксплуатации

Электродинамические усилия. Взаимодействие тока в стержне (секции) обмотки с пронизывающим его магнитным потоком создает усилие, пульсирующее с частотой 100 Гц. Для пазовой части, где действует в основном поток рассеяния, номинальное усилие определяется выражением:

$$F = 3{,}9 \cdot 10^{-6} \frac{I^2}{b_n}, \qquad (1.1)$$

где I — сила тока в стержне, А; b_n — ширина паза, м; F — усилие на единицу длины, Н/м.

F сравнительно невелико (не выше 100+3 Н/м у генераторов с косвенным охлаждением и 4×103 Н/м у генераторов с водяным охлаждением обмотки) и не может вызвать прямого механического повреждения изоляции. Однако при неудачной конструкции или исполнении крепления стержней именно эти силы приводят к вибрации и очень тяжелым повреждениям — пазовым разрядам, нарушению герметичности полых проводников и увлажнению и, наконец, истиранию изоляции. Усилия резко возрастают (на 1–2 порядка) при коротких замыканиях, но и в этом случае ударная прочность изоляции обычно значительно выше максимальной импульсной силы и повреждения изоляции и обмотки происходят только при нарушении ее крепления.

Термомеханические напряжения (т. м. н.) возникают вследствие тепловых перемещений проводников (меди) изоляции и сердечника и зависят от различия их температурных коэффициентов линейного расширения и температур.

Для наиболее часто встречающихся условий — слабой связи между изоляцией и статором и относительно малого модуля упругости изоляции для оценки линейных деформаций можно использовать выражение:

$$\varepsilon_{и} = \alpha_{м}(T_{м} - T_{о}) - \alpha_{и}(T_{и} - T_{о}), \qquad (1.2)$$

где $a_м = 1{,}6 \cdot 10^{-5}$ и $a_и = 1{,}2 \cdot 10^{-5}$ — коэффициенты линейного расширения меди и изоляции; $T_м \approx 130$ °C и $T_и \approx 100$ °C — максимальные температуры меди и внешнего слоя изоляции; $T_о$ — температура окружающей среды.

Оценка показывает, что вызываемая т. м. н. деформация $\varepsilon_н < 1 \cdot 10^{-3}$, т. е. не достигает разрушающего изоляцию уровня. Однако для машин, работающих в маневренных режимах с большим числом пусков, например гидрогенераторов, эти напряжения приобретают циклический характер и могут вызывать постепенное разрушение. Особенно опасны т. м. н. для термопластичной изоляции, у которой возможно появление остаточной деформации при рабочей температуре. Повреждения, вызванные т. м. н., явились одной из основных причин замены битумного связующего в изоляции на термореактивное.

Если между сердечником и поверхностью изоляции образуется хорошая адгезия, как это может произойти в системе изоляции, пропитываемой вместе с сердечником, то большая часть общего удлинения проводников в пазу воспринимается изоляцией в зоне вылета обмотки, деформация изоляции, зависящая в этом случае от соотношения длин вылета и пазовой части, может достичь критических значений.

1.1.3. Воздействие влажности

Исключая некоторые случаи специального применения, изоляция электрических машин во время работы не увлажняется, поскольку температура ее на несколько десятков градусов выше, чем температура окружающей среды. Поэтому изоляция обычно бывает не рассчитана на длительное увлажнение в рабочих условиях, и требования к влагостойкости ограничиваются условиями хранения.

В условиях длительной транспортировки и хранения при колебаниях температуры влагопоглощение воздуха может достигнуть насыщения, возможно, выпадения росы. Таким образом, будет происходить как объемное поглощение влаги, определяемое процессами молекулярной и капиллярной диффузии, так и поверхностное увлажнение, зависящее от гидрофильности изоляции. Наиболее опасным является второе, т. к. поверхностная влага может располагаться в виде каналов и мостиков между разнопотенциальными элементами обмотки, через которые под действием рабочего напряжения может пойти ток, обугливающий поверхность изоляции (трекинг).

Особые случаи внутреннего увлажнения возможны в машинах с водяным охлаждением обмотки при нарушении герметичности

полых проводников. Протечки, как правило, возникают в концевой части в местах соединений обмотки, и увлажнению подвергается межфазовая изоляция. В генераторах, эксплуатируемых при давлении водорода, превышающем давление воды, опасными являются режимы остановки генератора, когда после выпуска водорода возможно в течение некоторого времени существование давления воды в обмотке. В турбогенераторах с водяным охлаждением, работающих в воздушной среде, принимаются меры по глубокой осушке воздуха (вымораживанию влаги) и контролю его влажности, что резко снижает опасность увлажнения изоляции при небольших протечках. Таким образом, для предотвращения пробоя изоляции от увлажнения необходимо оценить ее состояние с учетом условий эксплуатации.

1.1.4. Тепловое старение изоляции

Тепловое старение изоляции является следствием постепенного химического изменения входящих в ее состав органических веществ, например, пленок, волокон, связующих.

Скорость протекания химических процессов определяется кинетикой реакций, для теплового старения — термической и термоокислительной деструкцией молекул, из которых состоит полимер (реакцией деструкции называют реакцию, протекающую с разрывом химической связи в главной цепи макромолекулы).

Для электрических машин, не имеющих системы водяного охлаждения обмотки, главной причиной выхода из строя изоляции являются тепловые воздействия. Поэтому повышение класса нагревостойкости изоляции, например за счет внедрения полимерных материалов на основе ароматического полиамида (фенилона), полиамида, полиамидимида и др. (нагревостойкость их 220° С и выше), позволяет повысить эксплуатационную надежность, мощность машины. В процессе теплового старения в изоляции происходят химические и физические изменения. Во-первых, длительное действие температуры и взаимодействие изоляции с кислородом воздуха вызывают усадку изоляции или появление в ней пор и трещин. При термоокислительных процессах может произойти и дополнительная сшивка молекул полимеров, приводящая к увеличению жесткости, появлению хрупкости. Во-вторых, возможен и обратный процесс — химическое разложение (деполимеризация) под действием темпера-

туры, при этом материал может размягчаться, выделять летучие продукты, разрушающие соприкасающиеся с ним другие компоненты. Физические изменения в системах изоляции, обусловленные процессом теплового старения, зависят от ее состава и конструктивного исполнения обмотки. Удобно их рассмотреть на примерах изоляции всыпной катушечной, шаблонной и стержневой обмоток. Неорганические компоненты изоляции — слюда, слюдинит, слюдопласт, стеклоткань, при рабочих температурах генератора практически не претерпевают каких-либо химических изменений, т. е. не старятся.

В термореактивной изоляции (ТРИ), состоящей из слюдинита, стеклоткани и эпоксидной смолы, старится связующее — термореактивная смола, ее деполимеризация приводит к повышению хрупкости — ухудшению механических свойств изоляции в целом.

В микалентной компаундированной изоляции (МКИ), состоящей из листов слюды, бумажной подложки и битумного лака, также старятся органические компоненты — бумажная подложка и битум, при этом подложка становится хрупкой, постепенно происходит ее химическое и механическое разрушение. Битумно-масляный лак, входящий в состав микаленты, и битумный компаунд, которым она пропитывается при компаундировке (пропитке и опрессовке), при старении становятся из вязких также хрупкими, частично улетучиваются, при механических воздействиях крошатся. В результате этого ослабляется связь как между слоями микаленты, так и между листками слюды в слое, изоляция легко расслаивается. При длительном нагреве микалентной изоляции параллельно с химическими процессами идет также процесс так называемого «распухания», имеющий в своей основе механические явления. С повышением температуры резко ухудшаются механические свойства лака и компаунда (они размягчаются), вследствие чего листки слюды, согнутые на углах сечения стержня, имеют возможность несколько распрямляться, тем самым увеличивать радиус закругления изоляции на углах стержня. При этом в меньшей степени распрямляются внутренние слои, испытывающие давление внешних слоев, в большей степени — внешние слои, сдерживаемые лишь вязкостью связующего и покровной лентой. Возможны другие условия теплового старения изоляции, например, сравнительно кратковременное действие температур, суще-

ственно превышающих допустимые рабочие температуры. Такие условия возникают, как правило, при местных перегревах в машине: местном перегреве активной стали, замыкании ряда элементарных проводников в пазовой части обмотки, изломе проводника со случайным контактом в месте излома, перегреве стержня из-за закупорки недопустимого числа полых проводников в генераторе с водяным охлаждением обмотки и т. п.

Относительно теплового старения изоляции можно сделать следующие выводы:

– для изоляции низковольтных машин тепловое старение является определяющим. Для экспериментальной оценки долговечности проводится циклическое тепловое старение с периодическим воздействием механических нагрузок и влаги;
– тепловое старение играет существенную роль для изоляции крупных машин и гидрогенераторов с воздушным охлаждением, особенно для МКИ. В этом случае старение может быть определяющим для срока службы изоляции, особенно, если фактическая температура близка к предельно допустимой.

Изоляция электрических машин, выбираемая с учетом указанных воздействий, должна обеспечивать их бесперебойную работу в течение установленного срока службы. Режимы, при которых надежная работа машины не гарантируется, являются аварийными. Анализ отказов электрических машин в эксплуатации показал, что значительная часть их происходит в период приработки, в основном из-за скрытых дефектов в изоляции. Наибольший процент отказов машин в период приработки приходится на витковую изоляцию. Выход из строя витковой изоляции в период приработки объясняется выявлением в ней дефектов, возникших от технологических воздействий (растяжения провода при намотке и ударов при укладке), вследствие чего значительно снижаются пробивное напряжение, механическая прочность, стойкость к растворителям при пропитке и сушке.

При укладке катушек высокого напряжения происходит снижение пробивного напряжения вследствие воздействия ударов и изгибания изоляции. От этих воздействий пробивное напряжение микалентой компаундированной изоляции снижается в среднем на 15 %, у некоторых других видов изоляции (например стеклослюдинитовой) это снижение еще больше (рис. 2). Однако если сни-

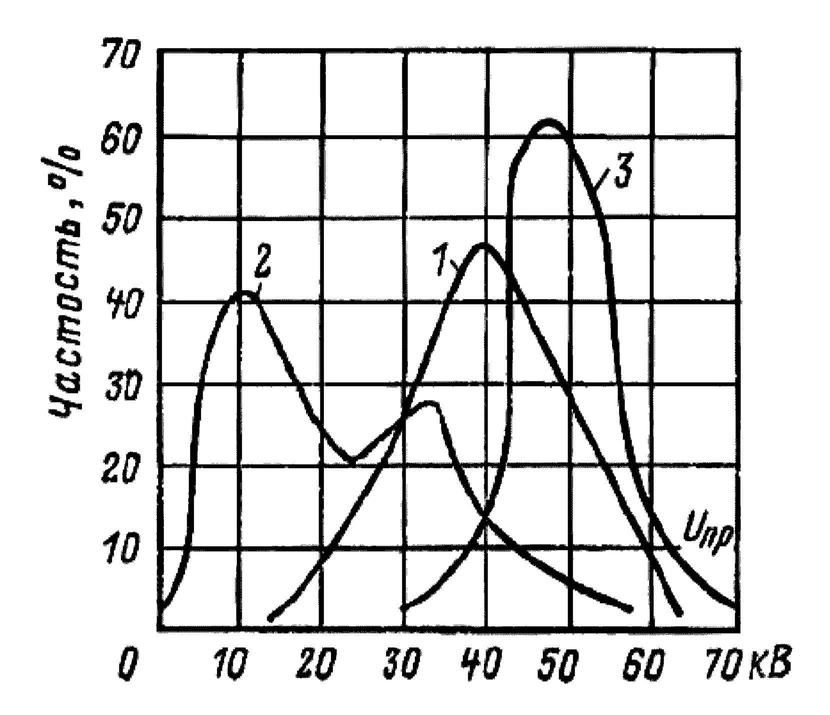


Рис. 2. График зависимости пробивного напряжения

жение пробивного напряжения изоляции в процессе изготовления обмоток не приводит к выходу из строя изоляции в период приработки, то оно влияет на срок ее службы не однозначно. Из данных табл. 1 видно, что одинаковое растяжение эмалированных проводов различных марок, при котором происходит примерно одинаковое снижение пробивного напряжения изоляции, по-разному сокращает сроки их службы.

Еще большее влияние на срок службы эмалированных проводов оказывают пропиточные лаки. Так, «жесткие» пропиточные лаки обычно снижают сроки службы витковой изоляции пропитанных обмоток по сравнению с непропитанными, а более эластичные могут его увеличивать (табл. 2–4). При пропитке водоэмульсионными лаками дефекты, возникшие в изоляции эмалированных проводов, также снижают сроки службы обмотки.

Приведенные здесь и далее сроки службы изоляции позволяют дать сравнительную оценку материалов и конструкций при испытании определенных макетов в определенных условиях, но не могут быть приняты для расчета какой-либо другой конструкции как абсолютные значения.

Таблица 1

Влияние растяжения на нагревостойкость эмалированных проводов

Марка провода	Диаметр, мм	Относительное удлинение, %	Средний срок службы образцов, ч, при температурах, °С					ТИ* 20000, °С
			125	150	170	190	210	
ПЭВ-2	1,81	0 15	6009 4679	1527 490	397 246	— —	— —	107 105
ПЭС-2	1,62	0 15	4852 2409	474 429	137 118	— —	— —	109 98
ПЭТВ-943	1,62	0 15	— —	— —	4026 1034	738 200	267 74	148 131
ПЭТВ-939	1,62	0 15	— —	— —	3964 4542	2397 1955	609 781	145 141
ПЭТВ-Ф-35	1,62	0 15	— —	— —	12761 168	3556 84	413 75	167 68
ПЭТВ-РЛ-603	1,62	0 15	— —	— —	5479 187	899 128	133 28	158 96
ПЭТ-155	1,50	0 15	— —	— —	— 4032	31285 2117	4762 411	188 153
ПЭФ-155	1,62	0 15	— —	— —	— —	2314 2147	1205 957	170 170
Провода на лаке Констатол Т928	1,25 1,25	0 15	— —	— —	11571 8600	4147 3266	1616 1344	160 154

ТИ* 20000 — температура, соответствующая сроку службы 20 000 ч.

Применение материалов для корпусной изоляции должно быть тесно увязано с конструкцией обмотки. Так, хрупкие миканитовые и слюдопластовые материалы марок ГФС, ГИП-ТС, ГИК-ЛСК-ЛСЛ при выкладке ими пазов малых машин повреждаются в изгибах и не обеспечивают ожидаемой нагревостойкости системы изоляции; эластичные же материалы, например гибкие стеклослюдопласты марок ГИТ-ЛСБ-ЛСЛ и ГИТ-ЛСБ-ПЛ, не повреждаются при укладке и увеличивают сроки службы изоляции. Более гибкая, чем миканитовая и слюдопластовая, стеклолакотканевая изоляция мало снижает пробивное напряжение при укладке обмоток, однако микротрещины, появляющиеся в стеклолакотканях на основе смоляных лаков, в процессе теплового старения развиваются

Таблица2

Влияние пропитки различными лаками на нагревостойкость эмалированных проводов диаметром 1,62 мм с полиэфирной изоляцией

Провода и пропиточный лак или состав	Общий срок службы образцов, ч, при температурах, °С			ТИ $_{20000}$ °С
	170	190	210	
ПЭТВ-943 без пропитки	4026	788	267	148
ПЭТВ-939 без пропитки	3964	2397	609	145
ПЭТВ-939, лак МГМ-8	3894	1738	736	135
ПЭТВ-939, лак МГМ-8 и эмаль ГФ-92ГС	3032	2641	877	117
ПЭТВ-939, лак ПЭ-933	5566	2870	1611	134
ПЭТВ-939, лак ПЭ-933 и эмаль ЭП-91	6358	3086	1611	141
ПЭТВ-RL-603, лак МГМ-8	3495	2456	1760	93
ПЭТВ-RL-603	5479	899	133	158
ПЭТВ-F-603, лак ПЭ-933	7134	3123	1764	144
ПЭТВ-F, лак XD	7669	1179	1208	147
ПЭТВ-F, лак МГМ-8	4170	1181	889	134
ПЭТВ-F без пропитки	12761	3556	413	167
ПЭТВ-F, лак ФА-97	5130	937	854	143
ПЭТВ-F, лак ПЭ-933	2316	885	518	132
ПЭТВ-943, лак ЭФ-3БСУ	10198	5477	–	–
ПЭТВ-943, лак ПФЛ-8в	2174	852	–	–
ПЭТВ-943, состав КР-18	2194	614	–	–

и приводят к быстрому выходу из строя изоляции. При разработке структуры изоляции должно быть известно, как изменяются ее свойства после технологических воздействий в процессе производства и эксплуатации. Высокие показатели конструкции в исходном состоянии в какой-то степени могут свидетельствовать о том, что изоляция не выйдет из строя в период приработки, но в значительно меньшей степени могут послужить для прогноза интенсивности ее старения и срока службы. Основным фактором, определяющим работоспособность конструкции изоляции, является способность ее противостоять эксплуатационным воздействиям. Поэтому при разработке конструкции изоляции следует знать и учитывать, при ка-

Таблица 3

Влияние пропитки различными лаками и покрытия эмалями на нагревостойкость скруток из проводов марок ПЭТ-155 диаметром 1,56 мм, ПЭФ-155 диаметром 1,62 мм и ПЭТ-200 диаметром 1,45 мм

Провода	Пропиточный состав	Покрывная эмаль	Средний срок службы образцов, ч, при температуре, °С			ТИ $_{20000}$, °С
			170	190	210	
ПЭТ-155	—	—	—	16218	2335	188
	МГМ-8	—	5465	1933	881	145
	ПЭ-933	—	13163	2379	2412	160
	ПЭ-933	ЭП-09Т	4274	2070	759	143
	ПЭ-933	ЭП-91	5889	2540	1142	144
	ПЭ-934	—	8919	4065	1445	154
	КП-34	—	15814	3184	1265	165
	КП-34	ЭП-91	8075	2710	1231	152
	КП-103	—	12252	4127	1267	163
	КО-964Н	—	48000	11236	5144	180
	КО-916к	—	33000	13676	1452	182
	КО-964Н	КО-935	25200	11592	3114	170
	ПЭ-993	—	13163	2379	2412	160
ПЭФ-155	КО-916к	—	11000	6100	—	—
	КО-964Н	—	11000	6100	—	—
	Бакелитовый лак	—	2189	1338	249	138
	ПЭ-933	—	8000	2500	—	—
ПЭТ-200	КО-916к	—	5500	2200	—	—
	КО-964Н	—	8000	5400	—	—

ких режимах и в какой среде, окружающей машину, будет работать изоляция. Повреждения изоляции вращающихся электрических машин происходят под действием четырех основных факторов: тепловых, электрических, механических и окружающей среды. Степень воздействия каждого из этих факторов на изолированные системы электрических машин различная. Интенсивность каждого из воздействий зависит от габаритов и конструкции машины, рабочего напряжения, режима работы и многих других эксплуатационных факторов.

Таблица 4

Влияние пропитки эпоксидными компаундами на нагревостойкость эмалированных проводов типов ПЭТВ и ПЭТ-155 диаметрами 1,45 и 1,62 мм

Период и пропиточный состав	Средний срок службы образцов, ч, при температуре, °C			$ТИ_{20000}$ °C
	170	190	210	
ПЭТВ-943 без пропитки	5078	1323	1219	125
ПЭТВ-943, компаунд MER-200+МТГФА	1502	1168	459	115
ПЭТВ-943, компаунд «Аралдит» CY-236+HY-984 фирмы «Цыба»	1422	932	235	124
ПЭТВ-943, компаунд «Аралдит» CY-209+HY-984	1325	1128	346	109
ПЭТВ-939 без пропитки	3964	2397	609	145
ПЭТВ-939, компаунд CY-309+HY-984 фирмы «Цыба»	1856	1182	354	121
ПЭТВ-939, компаунд «Аралдит» CY-236+HY=984	1510	1236	355	119
ПЭТ-155, компаунд MER-200+МТГФА	2087	968	413	124
ПЭТ-155, компаунд с-209+Н•984	1673	1000	287	122
ПЭТ-155, компаунд С-236+Н•984	1427	1033	346	112
ПЭТ-155 без пропитки	—	16218	2335	188

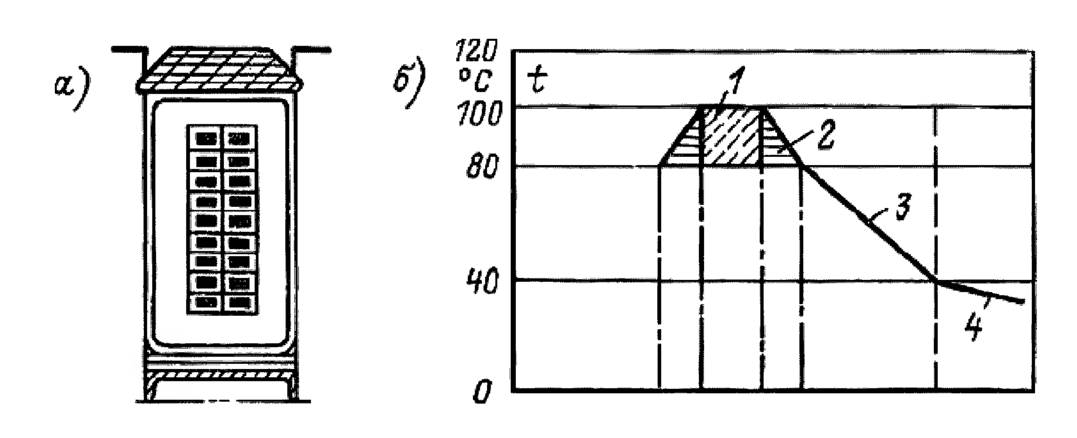
Поскольку воздействиям подвержена вся система изоляции, создание совершенной изоляционной конструкции, которая одинаково хорошо противостояла бы всем видам воздействий, представляется маловероятным и почти невозможным. Именно по этой причине разрабатывают специальные системы, отвечающие в первую очередь вполне определенным условиям работы. Важно определить, какие из воздействий наиболее опасны в каждом конкретном случае, и спроектировать изоляционную систему, наилучшую для данных условий. В эксплуатационных условиях интенсивность воздействий часто меняется. Динамика воздействий влияет на процесс повреждения изоляции. Обычно основным воздействием, приводящим

к повреждению изоляции, является тепловое. Тепло, как известно, образуется в результате джоулевых потерь в проводниках при прохождении тока, вследствие проводимости и диэлектрических потерь в изоляции, от трения. Перегрев зависит от конструкции электрической машины и нагрузки при эксплуатации.

С повышением температуры уменьшаются механическая прочность изоляции и коэффициент теплопередачи. При температурном расширении изоляционных материалов ослабляется их структура, увеличиваются воздушные полости, возникают внутренние механические напряжения. Особенно большие механические напряжения возникают в жестко связанных системах с значительно отличающимися коэффициентами теплового расширения. В процессе старения в изоляции могут накапливаться продукты распада, приводящие к образованию газовых пузырей, что снижает ее пробивное напряжение и механическую прочность. В результате механического воздействия, особенно внезапного короткого замыкания, ударов и вибрации, такая изоляция может повредиться даже при сравнительно небольшом сроке службы.

Тепловое старение делает изоляцию уязвимой для механических воздействий. При потере механической прочности или эластичности изоляция не способна противостоять обычным условиям вибрации или ударам, проникновению влаги и неодинаковым тепловым расширениям и сжатиям меди, стали и изоляционных материалов. Усадка изоляции от воздействия тепла приводит к ослаблению креплений и «разбалтыванию» катушек, клиньев, пазовых прокладок и крепежных конструкционных деталей, что способствует повреждению обмотки при относительно слабых механических воздействиях. Большая часть выходов из строя обмоток происходит в результате пробоя изоляции отдельных проводников или корпусной изоляции. Тепловое разрушение наблюдается в первую очередь на участках с максимальной температурой. Распределение температуры в катушечной обмотке высокого напряжения статора показано на рис. 3.

Как правило, сталь сердечника при работе электрической машины нагревается меньше, чем медь обмотки. Температурный коэффициент линейного расширения меди равен $1,7\times10^{-5}$, стали — $1,1\times10^{5}$ $°C^{-1}$. Относительное увеличение длины пазовой части катушки при длине L пакета стали определяется по выражению:



$\Delta IL =$ · tt_M

до короткого замыкания между витками; ток короткого замыкания прожигает проводник и изоляцию и приводит к замыканию на корпус. Время от начала межвиткового короткого замыкания до пробоя на корпус в ряде случаев может составлять несколько минут и менее. Определить приближение такой аварии практически невозможно.

Механические усилия, воздействию которых подвержены вращающиеся обмотки машин, в основном являются следствием центробежных сил, пусковых токов, вибрации и температурных деформаций.

При эксплуатации электродвигателей возникает вибрация от небаланса ротора, выработки подшипников, неуравновешенности приводимого механизма и передачи и т. д. В начальный период эксплуатации вибрация электродвигателей существенно не сказывается на надежности обмоток, т. к. пропиточный лак цементирует обмотку. В дальнейшем с изменением механических свойств изоляционных материалов и пропиточных лаков вследствие теплового старения влияние вибрации на надежность изоляции и выводных проводов становится все более ощутимым.

Механические нагрузки на изоляцию при пуске двигателей также сказываются на старении изоляции, причем пусковые приводы для одних и тех же двигателей зависят от привода, в котором они работают.

Термомеханические нагрузки на изоляцию зависят от температуры обмотки и степени ее закрепления в пазу. Деформация изоляции обмоток в результате разности температур и коэффициентов теплового расширения меди и железа описана выше, к ней добавляется деформация от вибрации, которая особенно выявляется при неудовлетворительном креплении обмоток в пазу и в лобовой части. Максимальные значения электродинамических нагрузок (давлений на изоляцию в пазу и усилий, действующих на лобовые части), возникающих при номинальном режиме и внезапном коротком замыкании в машинах переменного тока мощностью до 1000 кВт, при двух полюсах составляют, Па: в пазовой части — при стационарном режиме 5×10^4, при переходном 3×10^6, в лобовой части — при стационарном режиме $3{,}5 \times 10^2$, при переходном 2×10^5.

Главной причиной выхода из строя изоляции машин на низкое напряжение являются температурные воздействия. В машинах

на высокое напряжение электрическое напряжение воздействует на изоляцию между проводниками и на изоляцию между проводником и магнитопроводом. Кроме того, имеет место напряжение утечки по поверхности изоляции на корпус или между участками с различными электрическими потенциалами. Для качественной изоляции нагрев, вызванный электрическим полем при номинальном напряжении, несуществен. Большую опасность представляют собой перенапряжения, особенно если изоляция работала продолжительное время («состарилась»).

В нормальном режиме работы машины напряжение, приходящееся на один виток, обычно равно 5–25 В. Однако витковая изоляция может подвергаться воздействию перенапряжений: грозовых из-за остающегося напряжения на защитных коммутационных или вентильных разрядниках, которые возникают при нормальных включениях и отключениях электродвигателей, особенно при неодновременном замыкании контактов выключателя. В обоих случаях по обмотке распространяется волна напряжения с крутым фронтом. При отключении электродвигателей в момент гашения дуги появляются перенапряжения, достигающие (2,7–3,5)$U_ф$. Коммутационные перенапряжения — волны с фронтом 0,5–1,0 мкс, распространяясь в глубь обмотки, создают междувитковые напряжения, неравномерность распределения которых по катушкам тем больше, чем круче фронт волны и длиннее обмотка (для многовитковых катушек при волне с длиной фронта 0,1 мкс на первую приходится около 90 % амплитуды волны, при 0,2 мкс — 80 %, при 1,6 мкс — 20 %).

Распределение перенапряжений между витками каждой катушки многокатушечных обмоток сравнительно равномерно. На один виток первой катушки может приходиться напряжение равное:

$$UU_{вн} = 2{,}5 \quad \cdot 0{,}9 \cdot 1{,}15/W, \qquad (1.4)$$

где $2{,}5U_н$ — амплитуда коммутационного перенапряжения на одну фазу; $U_н$ — линейное рабочее напряжение; W — число витков в катушке; $2{,}5U_н \times 0{,}9$ — значение перенапряжения, падающего на первую катушку; 1,15 — коэффициент неравномерности распределения напряжения по виткам катушки.

В случае применения защитных разрядников максимальный уровень перенапряжений определяется их параметрами. В блоке

с трансформатором уровень перенапряжений в машине не превышает 1,5 5$U_{н}$. Напряжения на витковой изоляции обмоток возбуждения в стационарных и переходных режимах не превышают нескольких вольт.

Повреждения изоляции могут быть следствием чрезмерного импульса напряжения, ее ослабления при длительном действии напряжения, значительных механических напряжениях, следствием теплового старения. Условия работы изоляции ухудшаются в результате атмосферных влияний и, в частности, от воздействия влаги, всегда имеющейся в воздухе. Парциальное давление пара в воздухе не может превышать давления насыщенного водяного пара при данной температуре (рис. 4). При понижении температуры на поверхности изоляции конденсируется вода. Отношение количества влаги в воздухе к количеству влаги, соответствующей насыщению, — относительная влажность. Количество водяного пара зависит от температуры и относительной влажности воздуха (рис. 5).

В процессе работы машины, когда температура изоляции значительно превышает температуру окружающей среды, при увеличении влажности воздуха диффузия влаги через поверхность в толщу изо-

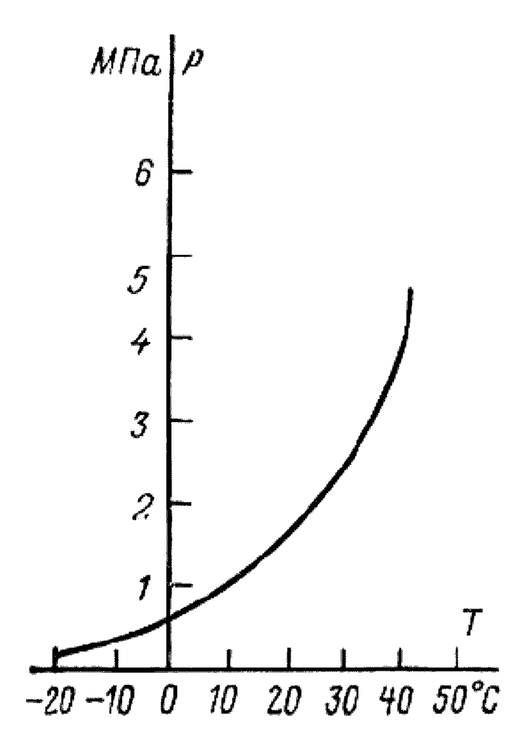


Рис. 4. Зависимость давления насыщенного водяного пара от температуры

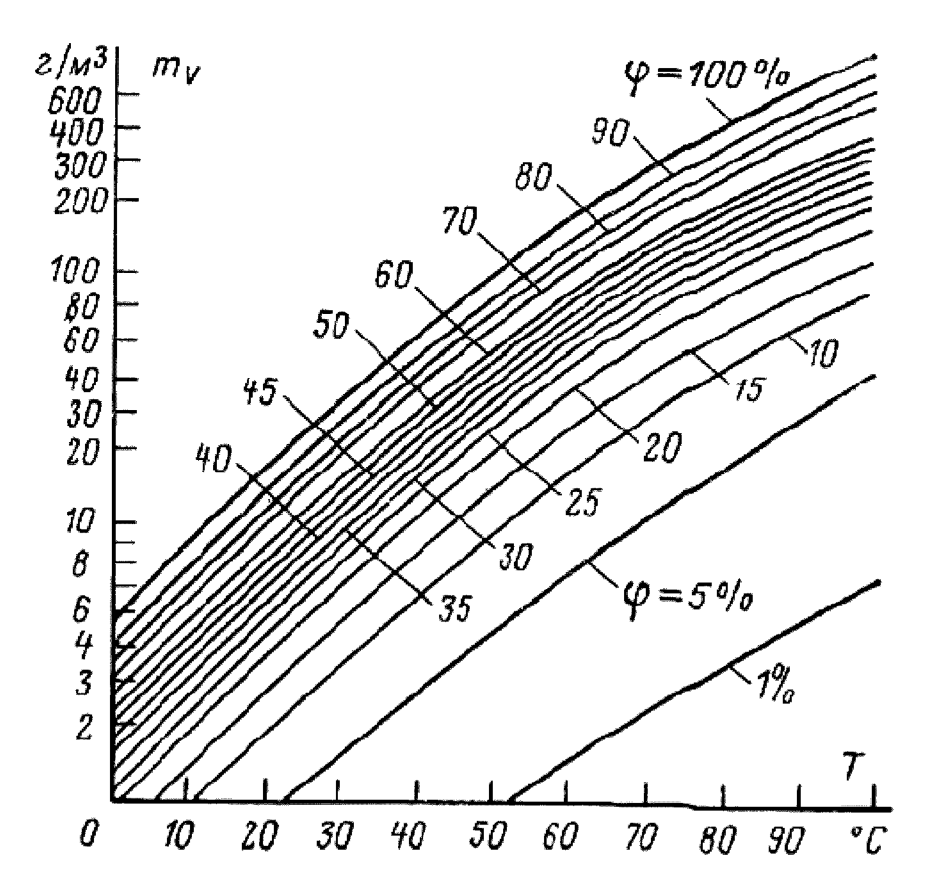


Рис. 5. Зависимость количества водяного пара от температуры и относительной влажности

ляции усиливается, однако количество поглощаемой влаги с ростом температуры значительно уменьшается в связи со снижением коэффициента растворимости. В порах нагретой изоляции при работе во влажной атмосфере воздух не насыщен влагой, вследствие чего не имеет места адсорбция полимолекулярного слоя воды.

Однако наличие влаги в порах может значительно уменьшить механическую прочность изоляции, усилить влияние ионизационных явлений, ускорить химическое старение некоторых материалов (например, целлюлозных), увеличить диэлектрические потери и в результате сократить срок службы и повысить аварийность электрооборудования. Особенно опасна влага, когда она сочетается с загрязнением поверхности изоляции или с химически активными и проводящими веществами, обычно в промышленных газах.

Запыленность атмосферы у машин, система охлаждения которых предусматривает соприкосновение наружной атмосферы с изоляци-

ей обмоток, может вызвать эрозию изоляции из-за ударов абразивных частиц. Эрозия наиболее сильна в местах, где воздушный поток имеет наибольшую скорость. Загрязнение машин проводящей пылью в сочетании с увлажнением приводит к поверхностному разрушению материала вследствие образования проводящих мостиков и обугливанию поверхностных слоев изоляции обмоток высокого напряжения под действием емкостных токов. В тропических условиях влияние влаги усугубляется появлением на поверхности изоляции плесневых грибков, кислотные продукты жизнедеятельности которых могут ее разрушать.

1.2. Требования к электроизоляционным материалам

Некоторые материалы, используемые в электрических приборах и схемах электроснабжения, обладают диэлектрическими свойствами, т. е. имеют большое сопротивление току. Эта способность позволяет им не пропускать ток, а поэтому их используют для создания изоляции токоведущих частей. Электроизоляционные материалы предназначены не только для разделения токоведущих частей, но и для создания защиты от опасного воздействия электрического тока. Например, шнуры питания электрических приборов покрыты изоляцией. Электроизоляционные материалы широко применяются в промышленности, радио- и приборостроении, развитии электрических сетей. Нормальная работа электрического прибора или безопасность схемы электроснабжения во многом зависит от используемых диэлектриков. Некоторые параметры материала, предназначенного для электрической изоляции, определяют его качество и возможности.

Применение изоляционных материалов обусловлено правилами безопасности. Электроизоляционные материалы должны иметь определенные свойства, чтобы выполнять свои функции. Главным отличием диэлектриков от проводников является большая величина удельного объемного сопротивления (109–1020 Ом×см). Электрическая проводимость проводников в сравнении с диэлектриками в 15 раз больше. Это связано с тем, что изоляторы по своей природе имеют в несколько раз меньше свободных ионов и электронов, которые обеспечивают токопроводимость материала. Но при нагрева-

нии материала их становится больше, что способствует увеличению токопроводимости.

Различают активные и пассивные свойства диэлектриков. Для изоляционных материалов наиболее важны пассивные свойства. Диэлектрическая проницаемость материала должна быть как можно меньшей. Это позволяет изолятору не вносить в схему паразитные емкости. Для материала, который используется в качестве диэлектрика конденсатора, диэлектрическая проницаемость должна быть, наоборот, как можно большей. К основным параметрам электроизоляции относят электрическую прочность, удельное электрическое сопротивление, относительную диэлектрическую проницаемость, угол диэлектрических потерь. При оценке электроизоляционных свойств материала учитывается также зависимость перечисленных характеристик от величин электрического тока и напряжения. Электроизоляционные изделия и материалы обладают большей величиной электрической прочности в сравнении с проводниками и полупроводниками. Важна также для диэлектрика стабильность удельных величин при нагревании, повышении напряжении и других изменениях. Классификация диэлектрических материалов в зависимости от мощности тока, проходящего по проводнику, используют разные типы изоляции, которые отличаются своими возможностями. Классификация диэлектриков основана на их агрегатном состоянии (твердые, жидкие и газообразные) и происхождению (органические: естественные и синтетические, неорганические: природные и искусственные). Наиболее распространен тип твердых диэлектриков, которые можно увидеть на шнурах бытовой техники или любых других электрических приборов. Твердые и жидкие диэлектрики, в свою очередь, делятся на подгруппы. К твердым диэлектрикам относятся лакоткани, слоистые пластики и различные виды слюды. Воски, масла и сжиженные газы представляют собой жидкие электроизоляционные материалы. Специальные газообразные диэлектрики используются намного реже. К этому типу также относится естественный электрический изолятор — воздух. Его использование обусловлено не только характеристиками воздуха, которые делают его прекрасным диэлектриком, но и его экономичностью. Применение воздуха в качестве изоляции не требует дополнительных материальных затрат.

Твердые диэлектрики

Твердые электроизоляционные материалы — наиболее широкий класс диэлектриков, которые применяются в разных областях. Они имеют различные химические свойства, а величина диэлектрической проницаемости колеблется от 1 до 50 000. Твердые диэлектрики делятся на неполярные, полярные и сегнетоэлектрики.

Их главные отличия состоят в механизмах поляризации. Этот класс изоляции обладает такими свойствами, как химическая стойкость, трекингостойкость, дендритостойкость. Химическая стойкость выражается в способности противостоять влиянию различным агрессивным средам (кислота, щелочь и т. д.). Трегингостойкость определяет возможность противостоять воздействию электрической дуги, а дендритостойкость — образованию дендритов. Твердые диэлектрики применяются в различных сферах энергетики. Например, керамические электроизоляционные материалы наиболее часто используются в качестве линейных и проходных изоляторов на подстанциях. В качестве изоляции электрических приборов используют бумагу, полимеры, стеклотекстолит. Для машин и аппаратов чаще всего применяют лаки, картон, компаунд. Для применения в различных условиях эксплуатации изоляции придают некоторые особые свойства путем сочетания разных материалов: нагревостойкость, влагостойкость, радиационная стойкость и морозостойкость. Нагревостойкие изоляторы способны выдерживать температуры до 700 °C, к ним относятся стекла и материалы на их основе, органосилиты и некоторые полимеры. Влагостойким и тропикостойким материалом является фторопласт, который негигроскопичен и гидрофобен. Изоляция, стойкая к радиации, используется в приборах с атомными элементами. К ней относятся неорганические пленки, некоторые виды полимеров, стеклотекстолит и материалы на основе слюды. Морозостойкими считаются изоляции, которые не теряют своих свойств при температуре до –90 °C. Особые требования предъявляются к изоляции, предназначенной для приборов, работающих в космосе или условиях вакуума. Для этих целей применяются вакуумно-плотные материалы, к которым относится специальная керамика.

Жидкие диэлектрики

Жидкие электроизоляционные материалы часто применяются в электрических машинах и аппаратах. В трансформаторе роль изо-

ляции играет масло. К жидким диэлектрикам также относят сжиженные газы, ненасыщенные вазелиновые и парафиновые масла, полиорганосилоксаны, дистиллированная вода (очищенная от солей и примесей). Основными характеристиками жидких диэлектриков являются диэлектрическая проницаемость, электрическая прочность и электропроводность. Также электрические параметры диэлектриков во многом зависят от степени их очистки. Твердые примеси могут увеличивать электропроводность жидкостей за счет разрастания свободных ионов и электронов. Очистка жидкостей путем дистилляции, ионным обменом и т. д. приводит к возрастанию величины электрической прочности материала, тем самым снижая его электропроводность. Жидкие диэлектрики разделяют на три группы: нефтяные масла; растительные масла; синтетические жидкости. Наиболее часто используются нефтяные масла, такие как трансформаторное, кабельное и конденсаторное.

Синтетические жидкости (кремнийорганические и фторорганические соединения) также используются в аппаратостроении. Например, кремнийорганические соединения морозоустойчивы и гигроскопичны, поэтому применяются в качестве изолятора в небольших трансформаторах, но их стоимость выше цены нефтяных масел. Растительные масла практически не используются в качестве изоляционных материалов в электроизоляционной технике. К ним относятся касторовое, льняное, конопляное и тунговое масло. Эти материалы представляют собой слабополярные диэлектрики и используются в основном для пропитки бумажных конденсаторов и в качестве пленкообразующего вещества в электроизоляционных лаках, красках, эмалях.

Газообразные диэлектрики

Наиболее распространенными газообразными диэлектриками являются воздух, азот, водород и элегаз. Электроизоляционные газы делятся на естественные и искусственные. К естественным относится воздух, которые применяется в качестве изоляции между токоведущими частями линий электропередач и электрических машин. В качестве изолятора воздух имеет недостатки, которые делает невозможным его использование в герметичных устройствах. Из-за наличия высокой концентрации кислорода воздух является окислителем, и в неоднородных полях проявляется низкая электрическая прочность воздуха. В силовых трансформаторах и высоковольтных кабелях в качестве

изоляции используют азот. Водород, кроме электроизоляционного материала, также представляет собой принудительное охлаждение, поэтому часто используется в электрических машинах. В герметизированных установках чаще всего применяют элегаз. Заполнение элегазом делает устройство взрывобезопасным. Применяется в высоковольтных выключателях благодаря своим дугогасящим свойствам.

Органические диэлектрики

Органические диэлектрические материалы делятся на естественные и синтетические. Естественные органические диэлектрики в настоящее время используются крайне редко, так все больше расширяется производство синтетических, тем самым снижая их стоимость. К естественным органическим диэлектрикам относят целлюлозу, каучук, парафин и растительные масла (касторовое масло). Большую часть синтетических органических диэлектриков представляют различные пластмассы и эластомеры, часто используемые в электрических бытовых приборах и другой технике.

Неорганические диэлектрики

Неорганические диэлектрические материалы делят на природные и искусственные. Наиболее распространенным из природных материалов является слюда, которая обладает химической и термической стойкостью. Также для электроизоляции используют флогопит и мусковит. К искусственным неорганическим диэлектрикам относят стекло и материалы на его основе, а также фарфор и керамику. В зависимости от области применения искусственному диэлектрику можно придать особые свойства. Например, для проходных изоляторов используют полевошпатовую керамику, которая имеет высокий тангенс диэлектрических потерь.

Волокнистые электроизоляционные материалы

Волокнистые материалы часто применяются для изоляции в электрических аппаратах и машинах. К ним относят материалы растительного происхождения (каучук, целлюлозу, ткани), синтетический текстиль (нейлон, капрон), а также материалы из полистирола, полиамида и т. д. Органические волокнистые материалы обладают высокой гигроскопичностью, поэтому редко используются без специальной пропитки. В последнее время взамен органических мате-

риалов применяют синтетические волокнистые изоляции, которые обладают более высоким уровнем нагревостойкости. К ним относится стеклянное волокно и асбест. Стеклянное волокно пропитывают различными лаками и смолами для повышения его гидрофобных свойств. Асбестовое волокно обладает малой механичной прочностью, поэтому нередко в него добавляют хлопчатобумажное волокно.

Материалы, применяемые в электрических машинах, разделяют на следующие виды: конструкционные, активные и электроизоляционные.

Конструкционные материалы применяют для изготовления деталей машины, преимущественным назначением которых является восприятие и передача механических нагрузок, а также обеспечение требуемой степени защиты, охлаждения, смены смазки и т. д. (станины, подшипниковые щиты, валы, жалюзи, уплотнители, вентиляторы и др.). В качестве конструкционных материалов используют сталь, чугун, цветные металлы и их сплавы, пластмассы. Активные материалы служат для протекания в машине электромагнитных процессов. Эти материалы подразделяют на магнитные и проводниковые.

Магнитные материалы применяют для изготовления магнитопроводов. Одним из основных требований, предъявляемых к магнитным материалам, является высокая магнитная проницаемость, т. е. чтобы требуемый магнитный поток в машине создавался возможно меньшим значением МДС.

Некоторые элементы магнитопроводов электрических машин (сердечники статоров машин переменного тока, якорей машин постоянного тока и т. п.) подвержены перемагничиванию, что вызывает потери энергии на вихревые токи и гистерезис. Поэтому к магнитным материалам, из которых изготовлены такие элементы магнитопроводов, предъявляются еще и требования: минимальные потери от перемагничивания и повышенное удельное электрическое сопротивление, что способствует уменьшению потерь от вихревых токов.

Наилучшим магнитным материалом, удовлетворяющим всем перечисленным требованиям, является тонколистовая электротехническая сталь. Широкий диапазон электромагнитных свойств электротехнической стали достигается изменением содержания кремния. Обычно сталь с меньшим содержанием кремния имеет меньшую магнитную проницаемость и большие удельные потери, но зато и большее допустимое значение магнитной индукции насыще-

ния. С повышением содержания кремния увеличивается хрупкость электротехнической стали, что создает определенные трудности при штамповке (образование трещин в зубцовой зоне). Это обстоятельство ограничивает применение высоколегированных электротехнических сталей для изготовления сердечников при небольших размерах зубцов и пазов. По способу прокатки электротехнические стали подразделяют на холоднокатаные и горячекатаные. Обозначение марки электротехнической стали состоит из четырех цифр:

– первая цифра указывает на вид прокатки и структурное состояние:
  – горячекатаная сталь;
  – холоднокатаная изотропная сталь, имеющая одинаковые магнитные свойства вдоль и поперек направления проката;
  – холоднокатаная анизотропная сталь, у которой магнитные свойства вдоль направления проката лучше, чем поперек;
– вторая цифра указывает на содержание кремния: О — до 0,4 %; 1 — 0,4–0,8 %; 2 — 0,8–1,8 %; 3 — 1,8–2,8 %; 4 — 2,8–3,8 %; 5 — 3,8–4,8 %;
– третья цифра указывает на группу по удельным магнитным потерям;
– четвертая цифра — порядковый номер типа стали.

Элементы магнитопровода, изготовляемые из листовой электротехнической стали, имеют шихтованную конструкцию, т. е. выполняются в виде пакета выштампованных листов, изолированных друг от друга изоляционной пленкой (лак, оксидная пленка), которая служит для ограничения вихревых токов.

В современных сериях асинхронных двигателей и машин постоянного тока преимущественное применение получили холоднокатаные изотропные стали марок 2013, 2312 и 2411, которые обладают высокими магнитными свойствами, хорошим качеством поверхности, малой разнотолщинностью. Применение этих сталей позволяет существенно улучшить энергетические показатели и уменьшить массу электрических машин.

Для изготовления сердечников главных полюсов применяют листовую конструкционную сталь толщиной 1 или 2 мм либо анизотропную холоднокатаную электротехническую сталь марки 3411 толщиной 1 мм. При изготовлении сердечников из анизотропной стали необходимо, чтобы продольная ось полюса совпадала с на-

правлением проката стали. Применение холоднокатаной стали марки 3411 для сердечников главных полюсов позволяет уменьшить магнитное рассеяние добавочных полюсов и ослабить размагничивающее действие реакции якоря. Объясняется это тем, что магнитный поток обмотки якоря, проходя «поперек» сердечников главных полюсов, т. е. перпендикулярно направлению проката электротехнической стали, испытывает повышенное магнитное сопротивление, что и ведет к уменьшению этого потока.

Станины машин постоянного тока изготовляют из стальных цельнотянутых труб либо их гнут и сваривают из стальных листов марки Ст 3. В некоторых случаях станины делают шихтованными из электротехнической стали.

Электроизоляционные материалы весьма разнообразны. Их свойства во многом определяют эксплуатационную надежность, габаритные размеры, массу и стоимость машины.

Одним из важнейших свойств электроизоляционных материалов является нагревостойкость — способность материала сохранять свои электроизоляционные и механические свойства при воздействии рабочих температур в течение времени, определяемого сроком службы электрической машины. Как отмечалось, все электроизоляционные материалы разделены на 12 классов нагревостойкости. Однако в современных электрических машинах применяют изоляционные материалы лишь трех классов В, F и Н, обладающие наиболее высокой нагревостойкостью.

Ниже приводится примерный перечень электроизоляционных материалов каждого класса нагревостойкости.

Класс нагревостойкости А. Волокнистые материалы из бумаги, хлопка, шелка, древесины и т. д., пропитанные жидкими диэлектриками либо погруженные в них. К этому классу относятся также изоляция эмальпроводов на основе масляных и полиамидно-резольных лаков, полиамидные пленки, бутилкаучуковые и другие материалы. Пропитывающими веществами для данного класса материалов являются трансформаторное масло, масляные и асфальтовые лаки и другие вещества соответствующей нагревостойкости. К данному классу относятся лакобумаги, лакоткани, пленкоэлектрокартон, гетинакс, текстолит.

Класс нагревостойкости Е. Изоляция эмальпроводов и электроизоляционные материалы на основе полиуретановых, эпоксидных,

полиэфирных смол и других синтетических материалов аналогичной нагревостойкости.

Класс нагревостойкости В. Материалы на основе неорганических диэлектриков (слюда, асбест, стекловолокно) и клеящих, пропиточных и покровных лаков и смол повышенной нагревостойкости органического происхождения с содержанием органических веществ по массе не более 50 %. К этому классу относятся материалы на основе щипаной слюды: миканит, микалента, микафолий; различные синтетические материалы: полиэфирные смолы на основе фталевого ангидрида, фторопласт-3, некоторые полиуретановые смолы, пластмассы с неорганическим наполнителем.

Класс нагревостойкости F. Материалы на основе слюды, асбеста и стекловолокна, но с применением органических лаков и смол, модифицированных кремнийорганическими и другими нагревостойкими смолами. Изоляция этого класса не должна содержать бумаги, целлюлозы и шелка.

Класс нагревостойкости Н. Те же материалы, что и в классе F, но с соответствующими по нагревостойкости кремнийорганическими лаками и смолами.

В процессе работы машины изоляция обмоток нагревается неравномерно, при этом измерение температуры нагрева в наиболее горячих точках (граница между токоведущим проводом и его изоляционным покрытием) оказывается технически невозможной. Поэтому согласно действующему стандарту предельные температуры нагревания обмоток принимают несколько ниже предельно допустимых температур для изоляции соответствующего класса нагревостойкости. Чрезмерный перегрев неблагоприятно влияет и на другие элементы машины: подшипники, контактные кольца, коллектор. Например, коллектор при чрезмерном перегреве может утратить цилиндрическую форму. Эксплуатация изоляционных материалов в соответствии с температурами, указанными для каждого класса нагревостойкости, обеспечивает им длительный срок службы (20–25 лет) без заметной потери изоляционных и механических свойств. Если же материал использовать при температурах, превышающих указанные для соответствующего класса нагревостойкости, то срок службы изоляции резко сокращается. Это объясняется интенсивным тепловым старением материала, сопровождаемым утратой им

электроизоляционных свойств и механической прочности. Экспериментально показано, что при повышении температуры на 10 °С сверх установленной классом нагревостойкости, срок службы изоляции сокращается примерно вдвое. Поэтому важнейшей задачей является правильный выбор типа электрической машины и ее эксплуатация без превышения номинальных данных сверхдопустимых величин и продолжительности. Если же температура частей машины намного ниже допустимой, то машина будет недостаточно использована, а это значит, что ее габаритные размеры и стоимость будут неоправданно завышены. Исключение составляют машины, к которым предъявляются требования повышенной надежности. Обычно электрическая изоляция обмотки состоит из нескольких видов электроизоляционных материалов, образующих систему изоляции. Непременным условием надежной работы такой системы изоляции является совместимость всех ее составляющих.

Одним из основных свойств электроизоляционных материалов, кроме диэлектрических, являются их тепловые свойства.Обычно при повышении температуры диэлектрические свойства и механическая прочность электроизоляционных материалов ухудшаются. Поэтому важно знать максимально допустимую температуру, при которой за определенное время еще не произойдут необратимые процессы в изоляции, приводящие к механическому разрушению, электрическому пробою и т. п. Электроизоляционные материалы должны обладать необходимыми для данной конструкции тепло- и нагревостойкостью.

Теплостойкость — это способность электроизоляционного материала сохранять свои функции при кратковременном нагреве. Теплостойкость — условная характеристика, связанная с механическими свойствами материала. При нагреве под действием механических нагрузок материал деформируется.

Теплостойкость зависит от структуры вещества и значения межмолекулярных сил. Так, полимеры с разветвленной структурой, особенно линейной, размягчаются при сравнительно невысоких температурах — они термопластичны. Полимеры с пространственной структурой неплавки — термореактивны. Теплостойкость материалов оценивается температурой при определенных условиях испытаний: для изоляции эмалированных проводов — температурой

термопластичности (процент деформации под нагрузкой), для битумов и смол — температурой размягчения или плавления (по «кольцу и шару», Кремер–Сарнову, Убеллоде и др.), для твердых диэлектриков — температурой, при которой изгибающее усилие 5×10^6 Па вызовет определенную деформацию образца (по Мартенсу).

Однако большая часть материалов может кратковременно выдерживать высокую температуру, но в случае длительной работы при повышенной температуре они быстро старятся — их свойства необратимо ухудшаются.

Поэтому все электроизоляционные материалы характеризуются также нагревостойкостью — способностью диэлектрика выдерживать воздействие повышенной температуры в течение времени, сравнимого со сроком нормальной эксплуатации, без недопустимого ухудшения свойств. Нагревостойкость электроизоляционных материалов определяется степенью их теплового старения при предельно допустимой для них температуре. При старении, т. е. необратимом изменении электрических и механических свойств с течением времени, изоляционные материалы перестают выполнять свои функции в конструкции. Условия, при которых работает изоляция, могут усилить или ослабить процессы старения.

Старение является следствием в основном двух процессов — химического и физического. При соприкосновении нагретой изоляции с воздухом или окисляющими веществами образуются летучие продукты, которые, испаряясь, вызывают усадку изоляции или появление в ней пор и воздушных включений. При термоокислительных процессах может произойти и сшивка молекул полимеров (полимеризация), приводящая к нарастанию жесткости, появлению хрупкости и усадке изоляции. При химическом разложении — деполимеризации — материал может размягчаться, выделять летучие продукты, разрушающие соприкосающиеся с ним материалы. К таким же последствиям приводит и гидролиз — разложение материалов под действием влаги.

Размягчение и плавление изоляционных материалов при нагреве — это обратимые физические процессы, они могут привести к необратимым изменениям формы и размеров изоляции. Такие деформации могут происходить до старения материалов, а также вследствие их теплового старения, когда образуются продукты с меньшей

молекулярной массой, имеющие более низкую температуру размягчения и плавления. Усадка материала и появление в нем пор происходят как при улетучивании низкомолекулярных продуктов (пластификаторов, низкокипящих фракций в битумах и др.) в процессе изготовления конструкций изоляции, так и при улетучивании продуктов, появившихся в процессе старения вследствие деполимеризации и термоокислительной деструкции. Влияние кислорода воздуха и других окислителей на процессы старения материалов различно. Полимеры с молекулами, содержащими двойные связи (например, каучуки), более чувствительны к термоокислительной деструкции, чем насыщенные соединения (полиэтилен и др.). Первые обычно окисляются при температуре даже ниже 100 °C, вторые — при более высоких температурах.

Нагревостойкость большинства органических веществ обычно не более 130 °C. Однако в настоящее время изменяются органические материалы на основе ароматического полиамида, полиамидимидов, политетрафторэтилена и др., нагревостойкость которых 220 °C и выше. В связи с тем, что связь –Si–° — в основной цепи полиорганосилоксановых соединений значительно прочнее связи — C–C — в органических соединениях, полиорганосилоксановые соединения могут работать при температуре 180–200 °C и даже выше.

Повышение жесткости и хрупкости электроизоляционных материалов приводит к резкому нарастанию внутренних напряжений и, как следствие, к растрескиванию изоляции, прежде всего в местах с максимальными внутренними напряжениями и минимальной механической прочностью. Растрескивание происходит и при резких колебаниях температуры в процессе эксплуатации из-за разности между температурными коэффициентами линейного расширения металла обмотки и электроизоляционных материалов. В результате старения электрическая прочность изоляции значительно уменьшается, особенно при проникновении в трещины влаги и загрязнений. Как уже указывалось выше, скорость старения в основном определяется температурой, при которой работает изоляция. При не слишком большом температурном интервале влияние температуры на скорость процессов старения выражается общим законом зависимости скорости химических реакций от температуры, описанным уравнением Вант-Гоффа–Аррениуса:

$$K = Pze^{-E/RT}, \quad (1.5)$$

где K — постоянная скорости реакций; P — фактор вероятности; z — число столкновений между реагирующими молекулами; E — энергия активизации; R — молярная газовая постоянная; T — абсолютная температура.

Если уравнение записать в логарифмической форме и учесть, что для данного материала P, z и E — величины постоянные, получим линейную зависимость между логорифмом значения срока службы материала и величиной, обратной абсолютной температуре:

$$\lg L = A + B/T, \quad (1.6)$$

где L — срок службы; A, B — постоянные.

Системы изоляции, у которых при одинаковых сроках службы значения рабочих температур примерно одинаковые, объединяют в один класс. Классы нагревостойкости конструкций определяют путем сравнительных испытаний на срок службы при трех температурах новых конструкций и конструкций, класс нагревостойкости которых известен из длительного опыта эксплуатации. В результате испытаний находят максимально допустимую температуру эксплуатации, при которой обеспечивается определенный срок службы изоляции. Так как характер старения каждого из материалов, входящих в систему изоляции, различен и в процессе старения материалы могут взаимодействовать, нагревостойкость их не может рассматриваться вне композиции. Поэтому, выбирая материалы для конструкции, предназначенной для длительной работы при определенной температуре, необходимо изучить их взаимодействие в процессе старения и испытать электроизоляционную конструкцию на срок службы. При неудачном сочетании электроизоляционных материалов в процессе работы машины может произойти ускоренное разрушение одного материала под воздействием соседнего. Например, быстро старятся материалы от выделяющегося из поливинилхлоридных трубок хлористого водорода; ускоряется старение полиэтилентерефталатной пленки, наклеенной на электрокартон, который относительно быстро впитывает в себя влагу, способствующую гидролизному старению пленки, к тому же продукты разложения картона также разрушают пленку. Большое влияние на срок службы изоляции обмоток оказывают механические напряжения, при-

водящие к дефектности изоляции как в процессе ее изготовления, так и при эксплуатации. Особенно велика их роль в системах пленка эмалированного провода — пропиточный состав. При увеличении механических напряжений (в частности, от растягивающих усилий) срок службы изоляции обязательно снижается, но для разных материалов в различной степени. При тепловом старении соотношение и интенсивность разных процессов, происходящих в изоляции, могут меняться вследствие изменения не только механических напряжений в материалах, но и их воздухопроницаемости.

Значение коэффициента диффузии определяется характером строения материала, в который диффундирует воздух, плотностью упаковки частиц и характером взаимодействия и связей молекул материала и диффундирующего воздуха. Чем больше «сшита» молекула полимера, тем меньше в ней зон активных и меньше коэффициент диффузии.

У ряда полимерных материалов (в частности, у каучуков, у которых значительно сшиваются молекулы в процессе теплового старения) воздухопроницаемость в результате старения уменьшается.Так, при увеличении числа слоев стеклокаучуковой изоляции (эскапоновая стеклолакоткань) процесс старения нижних слоев замедляется и сроки службы такой изоляции увеличиваются, несмотря на то, что изоляция на высокое напряжение работает при больших напряженностях электрического поля, чем изоляция на низкое напряжение. При таком же увеличении числа слоев неплотной микалентной изоляции срок ее службы уменьшается (табл. 5) в связи с увеличением напряженности электрического поля при испытаниях.

Электроизоляционные материалы должны обладать и максимально высокой теплопроводностью, т. к. тепло от потерь в проводниках обычно отдается в окружающую среду через изоляцию. Допустимым нагревом машины в значительной мере определяется ее экономичность. Теплопроводность некоторых материалов приведена в табл. 6.

Желательно, чтобы температурные коэффициенты расширения электроизоляционных материалов, входящих в системы изоляции и сопряженных с ними в конструкции металлов (меди, алюминия, стали), различались мало. Температурные коэффициенты линейного расширения некоторых электротехнических материалов, приведены в табл. 7.

Таблица 5

Зависимость срока службы изоляции макетов от числа слоев изоляционного материала и напряженности электрического поля при испытании напряжением после каждого цикла теплового старения

Материал и пропиточный состав	Толщина изоляции на одну сторону, мм	Число слоев	Средняя напряженность при испытании, МВ/м	Средний срок службы, ч, при температуре, °С				$ТИ_{20000}$ °С
				125	150	170	190	
Микалента ЛМЧ-ББ толщиной 0,17 мм, лак МГМ-8	2,1	6	4,3	13812	3522	538	—	119
Микалента ЛМЧ-ББ толщиной 0,17 мм, битум (компаундирование)	2,1	6	4,3	—	2056	789	360	120
Эскапоновая стеклолакоткань марки ЛСЭЛ толщиной 0,17 мм, лак МГМ-8	2,1	6	4,3	—	2363	663	208	120
Стеклолакоткань ЛСЛ толщиной 0,17 мм	0,7	2	1,4	14123	3020	996	—	120
Лакоткань ЛХМ толщиной 0,17 мм	0,7	2	1,4	7380	1624	547	—	110

Для обеспечения достаточной эксплуатационной надежности электрических машин электроизоляционные материалы должны также иметь высокие механические свойства, необходимые для сохранения электрической прочности при изготовлении машин и длительной их эксплуатации, когда изоляция обмоток подвергается воздействию вибраций, электродинамических усилий, ударных нагрузок, изгибающих усилий, истиранию и во вращающихся частях центробежным усилиям. Под воздействием повторных нагрузок могут наступить усталость материала и его полное или частичное разрушение. Появление трещин приводит не только к уменьшению механической прочности, но и к образованию частичных разрядов в полостях изоляции, вызывающих перераспределение напряжения

Таблица 6

Теплопроводность материалов

Материал	Теплопроводность, Вт/(м×К)
Чугун	62
Медь	373–410
Алюминий	209–220
Сталь	41–48
Фибра	1,1–1,4
Леатероид	1,0–1,2
Слюда флогопит	0,5–0,62
Слюда мусковит	0,42–0,48
Миканиты	0,14–0,41
Политетрафторэтилен	0,20–0,25
Органические смолы	0,14–0,22
Слоистые пластики	0,15–0,27
Ацетобутиратцеллюлозные, поликарбонатные пленки	0,15–0,18
Триацетатные пленки	0,12–0,18
Полиэтилентерефталатные и полиимидные пленки	0,15–0,18
Непропитанный электрокартон	0,16–0,18
Пропитанный электрокартон	0,23–0,25
Пленкоэлектрокартон	0,10–0,12
Дерево	0,15–0,45
Резина	0,15
Хлопчатобумажная ткань	0,07
Хлопчатобумажная ткань, пропитанная лаком	0,12–0,25
Лакоткань	0,12–0,25
Асбест	0,15–0,30
Воздух (зазоры)	0,025–0,05
Сухая бумага	0,1
Пропитанная бумага	0,15

Таблица 7

Температурные коэффициенты линейного расширения

Материал	Температурный коэффициент линейного расширения, 10^{-5} К$^{-1}$
Фенолформальдегидные смолы	2–6
Анилиноформальдегидные смолы	5–6
Мочевиноформальдегидные смолы	2,7
Меламиноформальдегидные смолы	4
Полиэфирные	8–10
Эпоксидные	6
Кремнийорганические	16–25
Политетрафторэтилен	8–25
Полифтортрихлорэтилен	4,5–12
Поливинилхлорид	6–7
Полистирол	6–8
Полиэтилен	16–18
Полиамиды	6–10
Поливинилацетали (винифлекс)	6,4
Полиэтилентерефталатные пленки	1,7
Полиимидные пленки	2,0
Поликарбонатные пленки	5,8
Стеклянное волокно	10–15
Стекловолокнит	1,8–2,0
Пластмасса УЕ-301-41	0,8–1,5
Пластмасса У1-301-07	3,0–3,5
Слюда мусковит	1,35
Слюда флогопит	0,85
Резина	7,0
Древесина (дуб)	0,75–5,4
Медь	1,7
Алюминий	2,5
Железо	1,1

по толщине изоляции и ее повреждение из-за нагрева около очагов разрядов, способствующее созданию условий для электрического и теплового пробоев. Изоляция обмоток должна обладать достаточной электрической прочностью в диапазоне рабочих температур, а в машинах высокого напряжения — также короностойкостью, т. е. способностью выдерживать коронный разряд без недопустимого ухудшения свойств, и иметь небольшие диэлектрические потери при рабочих температурах, т. к. дополнительный нагрев от потерь вызывает ускоренное старение изоляции, а также снижение электрической прочности. Для качественной изоляции нагрев от диэлектрических потерь при номинальном напряжении незначителен, при испытании изоляции обмотки повышенным напряжением он может стать ощутимым. С ухудшением свойств материала при рабочем напряжении может возникнуть тепловой пробой, вероятность которого повышается при увлажнении. Ионизированные частицы могут вызвать эрозию материала. Озон, появляющийся при электрическом разряде в воздухе, взаимодействуя с азотом воздуха, образует окислы азота и далее в присутствии влаги — азотную кислоту. Особенно велики энергия разрядов и эрозия изоляции в воздушных зазорах у стенок паза. Ввиду кумулятивного характера воздействий частичных разрядов важную роль играет длительность воздействия электрического поля. Различные диэлектрики по-разному старятся в полях высокой напряженности. Например, эфиры целлюлозы и полиэтилентерефталатные пленки быстро разрушаются при появлении короны, а кремнийорганические полимеры короностойки. Изоляционные материалы должны иметь достаточную влагостойкость — способность выдерживать воздействия атмосферы, близкой к состоянию насыщения водяным паром, без недопустимого снижения свойств, особенно для машин, работающих в условиях повышенной влажности. Взаимодействие влаги с материалом может быть механическим, химическим и физико-химическим. При механическом взаимодействии пленка воды адсорбируется на поверхности изоляционного материала. Толщина ее зависит от относительной влажности воздуха и времени адсорбации (рис. 6). Чем толще пленка, тем больше она уменьшает поверхностное сопротивление, которое также зависит от чистоты поверхности материала и полярности его молекул. Поверхностное сопротивление полярных и пористых мате-

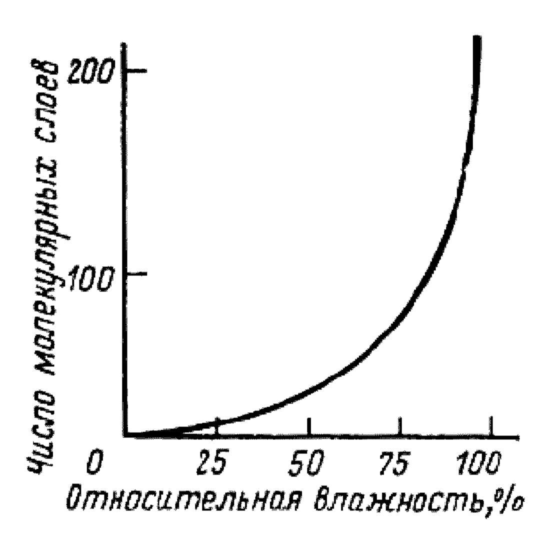


Рис. 6. Зависимость числа молекулярных слоев воды на поверхности стекла от относительной влажности воздуха

риалов низкое, оно резко меняется в зависимости от влажности воздуха и в меньшей степени реагирует на загрязнения. Поверхностный слой влаги и загрязнения резко понижают разрядное напряжение. В изоляции электрических машин имеются пустоты из-за трещин, пор, неплотного прилегания слоев и т. п. При недостаточной влагозащите поверхности изоляции крупные пустоты быстро заполняются влажным воздухом и на их внутренней поверхности адсорбируется влага, аналогично тому как она адсорбируется на поверхности материала. Из этих пустот влага постепенно диффундирует внутрь изоляции, содержание ее в материале увеличивается обычно по логарифмическому закону. Постоянная времени процесса водопоглащения зависит от материала, температуры изделия, отношения его поверхности к объему и др. Связь воды с изоляционным материалом может быть химической. Если она обеспечивается силами основной валентности, вода вступает в реакцию с материалом (гидролиз). В случае физико-химической связи влага входит в материал в виде кристаллической или гидратационной воды, удерживаясь связями побочной валентности.

Изоляционные материалы должны быть технологичными — давать возможность максимального снижения трудоемкости изготовления изоляционной конструкции при минимальном снижении электрической и механической прочности в процессе производства. К электроизоляционным материалам, предназначенным для специ-

альных условий эксплуатации, предъявляют некоторые дополнительные требования:

– тропикостойкости, в основном обеспечиваемой высокой влагостойкостью при повышенной температуре окружающего воздуха и высокой плеснестойкостью (в тропическом климате на электроизоляционных материалах могут развиваться плесневые грибы, разрушающие изоляцию и создающие проводимость ее поверхности), поэтому применение материалов на основе целлюлозы (бумаг, хлопчатобумажных и шелковых тканей, пластмасс с целлюлозными наполнителями и др.) для тропических условий недопустимо и необходима замена таких материалов материалами на основе стеклянных или синтетических волокон;
– холодостойкости — способности изоляции без повреждения и существенного ухудшения практически важных свойств выдерживать действия низкой температуры и быстрой смены температур (остывания до низкой температуры при отключении и нагрева до рабочей при включении);
– химостойкости — способности изоляции к надежной эксплуатации при контакте с химически агрессивными средами, например парами кислот или щелочей. Следует учитывать, что материалы, стойкие к воздействию одних сред, могут быть не стойкими к воздействию других.

В зависимости от условий работы машины, а также назначения материалов в электроизоляционной конструкции (несения основной или вспомогательной функции) выбираются материалы с преобладанием тех или иных свойств (помимо нагревостойкости, являющейся основным свойством). Для материалов, несущих основную электрическую нагрузку (основной изоляции), требуется в первую очередь высокая электрическая прочность; для изоляции влагостойкого исполнения — высокая электрическая прочность и влагостойкость; для материалов, несущих вспомогательные функции, защищающих основную изоляцию от механических воздействий в процессе изготовления конструкции и при эксплуатации, требуется повышенная механическая прочность.

2. СПЕЦИФИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ И СИСТЕМ ИЗОЛЯЦИИ

Обычно в стандартах и технических условиях на электроизоляционные материалы приводятся их основные физические параметры в исходном состоянии, что недостаточно для правильного выбора материалов. Такой выбор может быть осуществлен только на основании знания как технологических, так и эксплуатационных свойств материалов. Важно также знать технологические и эксплуатационные свойства материала в системе изоляции, т. к. свойства системы изоляции могут отличаться от свойств материалов, составляющих ее.

2.1. Оценка технологических свойств материалов и проводов

В процессе изготовления изоляционных конструкций материалы, из которых они состоят, испытывают механические нагрузки — растягивающие, изгибающие, давящие, истирающие, надрывающие. Необходимо, чтобы выбранный материал выдерживал такие нагрузки. На изоляцию воздействуют пропиточные составы и температура сушки после пропитки, которые могут повредить изоляцию или изменить ее свойства. Кроме того, в композиционной изоляции очень часто один материал воздействует на другой, что также изменяет их исходные свойства.

2.1.1. Оценка гибких композиционных материалов для пазовой изоляции

Для механизации процессов укладки всыпных обмоток, уменьшения толщины изоляции и снижения трудоемкости изоляционно-обмоточных работ при изготовлении электрических машин со всыпной или полукатушечной обмотками создана гамма компо-

зиционных материалов, которые укладываются в пазы в виде одной коробочки, состоящей из двух амортизирующих и одного основного материалов. В процессе укладки обмоток такая изоляция претерпевает изгибающие усилия (формообразование по периметру паза), надрывающие на выходе из паза (от укладки катушек и формования лобовой части обмотки), давление с возможным проколом (от гребенки и заусенцев листов магнитопровода в пазу и особенно на выходе из паза). Эти усилия будут тем меньше, чем эластичнее изоляция и чем меньше она деформируется, что зависит от конструктивного исполнения и геометрии обмотки и коэффициента заполнения паза. Для оценки способности гибких материалов противодействовать этим силам необходимо определять их сопротивление надрыву, жесткость, стойкость к изгибаниям по методикам, оценивающим эти параметры. Для определения сопротивления надрыву полоски материала шириной 15 и длиной не менее 240 мм, вырезанные из листа в определенном направлении, перегибают через опорную грань скобы (рис. 7), закрепленной в верхнем зажиме разрывной машины, и затем оба конца закрепляют в нижнем зажиме испытательной машины. Время приложения нагрузки к образцу до момента его разрушения должно составлять 10–60 с. Сопротивление надрыву оценивается по нагрузке, при которой по краям образца начинается надрыв материала (табл. 8).

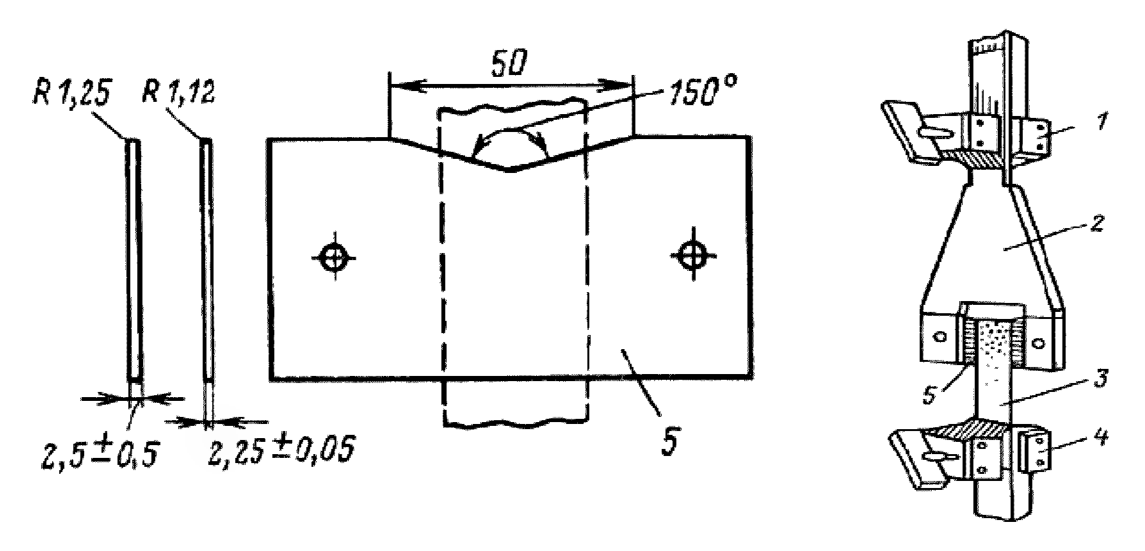


Рис. 7. Скоба для определения сопротивления надрыву гибких электроизоляционных материалов: 1 — верхний зажим; 2 — рамка; 3 — образец; 4 — нижний зажим; 5 — скоба

Таблица 8

Сопротивление надрыву гибких изоляционных материалов

Материал	Марка	Средняя толщина, мм	Среднее значение сопротивления надрыву, Н			
			в скобе круглой		в скобе МЭК (угловой)	
Гибкий миканит	ГФЧ-ББ	0,20	7–45	—	5–34	—
Гибкий стекломиканит	ГФС-ТТ	0,50	140–200	—	110–190	—
	ГФС-Т	0,25	124–270	—	35–58	—
	ГФС-Т	0,35	270	—	88	—
Лакостекломиканит	ГФК-Т-ЛСК	0,50	470–540	290–440	410–470	220–350
Гибкий слюдинит	Г2СП	0,20	310–520	120–400	270–480	40–290
Гибкий слюдопласт	ГИТ-Т-ЛСБ	0,45	290–550	350–800	150–490	180–500
	ГИТ-ЛСБ-ЛСЛ	0,55	500–890	420–830	240–420	250–620
Стеклолакорезинослюдопласт	ГИТ-ТрТр	0,58	1070–1360	1010–1560	590–1100	560–1100
Имидофлекс	—	0,20	660	550	370	290
Изофлекс-3	—	0,40	540	500	210	270
Электрокартон	ЭВ	0,10	14–25	19–31	15–20	17–25
	ЭВ	0,20	46–76	50–78	30–42	36–44
	ЭВ	0,30	85–110	114–125	47–53	65–70
Пленкосинтокартон	Триволь-терм	0,20	680	660	400	530
	ПСК-Л	20–0,25	530–700	540–780	530–630	510–690
	ПСК-Ф	0,29	680–740	690–750	650–750	670–730
	ПСК-Ф	0,42	1260	1300	1300	1300
	Изоном	0,23	840	850	580	870
	Изоном	0,35	1230	1410	1330	1420
	NT 105*	0,40	970	960	780	730
	NTN 2102*	0,38	1400	1450	1450	1450

* NT — односторонний; NTN — двусторонний (Япония).

При укладке обмоток важно, чтобы гибкая изоляция не сминалась и не сильно пружинила, что затрудняет укладку. Методикой МЭК предусмотрено испытание гибких материалов на жесткость путем определения нагрузки, при которой шток приспособления (рис. 8) проталкивает полоску материала размером 200×10 мм в прорезь (табл. 9).

Приспособление состоит из основания, имеющего в центре прорезь шириной 5±0,05 мм, и плоского металлического бруска шириной 2±0,05 и высотой 10 мм, укрепляемого в зажимы динамометра. Брусок со скоростью 25–50 мм/мин должен симметрично входить в прорезь основания, которая закрыта испытуемым образцом.

Стойкость материалов к изгибанию оценивается путем испытаний на фольцевание. Для испытаний разработан специальный прибор — фальцер (рис. 9). На основании укрепляются упор и два вращающихся ролика, причем нижний приводится в движение рукояткой. К верхнему ролику прикрепляется выбранный груз массой 15 кг для пленкосинтокартонов. Образцы размером не менее 250×250 мм предварительно изгибают вручную на расстоянии 40 мм от краев, затем помещают в прорезь фальцера и изгибают, про-

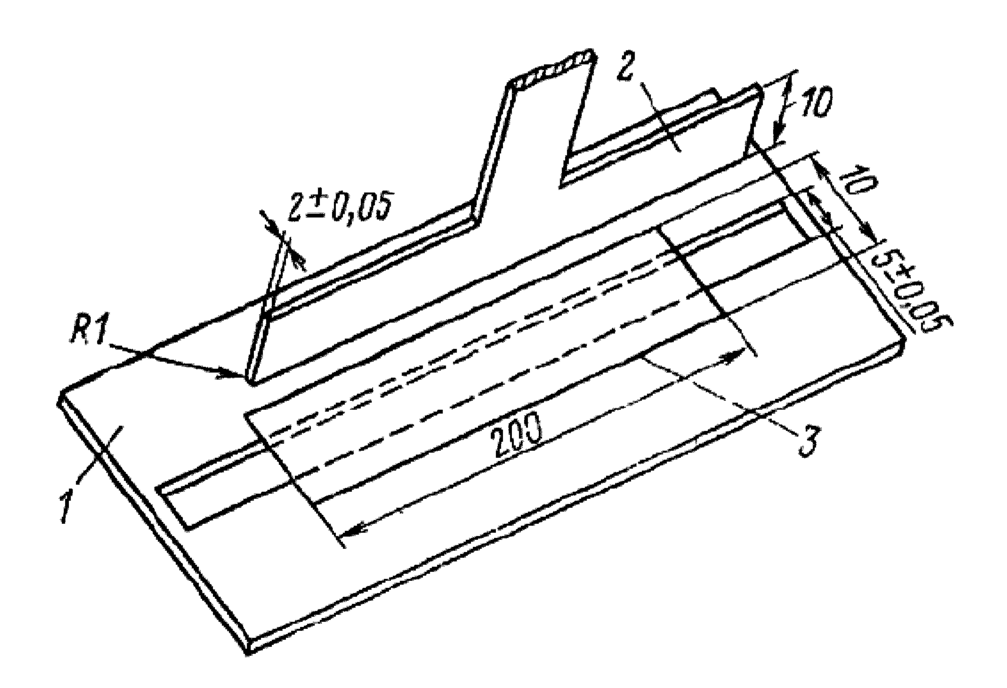


Рис. 8. Эскиз приспособлени я для определ ения жесткости:
1 — основание; 2 — шток; 3 — образец

Таблица 9

Жесткость гибких изоляционных материалов

Материал	Марка	Средняя толщина, мм	Средняя нагрузка, Н			
			в кольце (продольная)		в приспособлении МЭК	
			вдоль	поперек	вдоль	поперек
Гибкий миканит	ГФЧ-ББ	0,20	74–104	—	17–41	—
Гибкий стекломиканит	ГФС-Т	0,25	22–27	—	76–113	—
	ГФС-Т	0,35	320	—	73	—
	ГФС-ТТ	0,50	910–970	—	260–370	—
Лакостекломиканит	ГФК-Т-ЛСК	0,50	210–260	160–260	29–72	48–90
Гибкий слюдинит	Г2СП	0,20	16–45	20–53	6–19	14–38
Имидофлекс	—	0,20	100–198	94–190	57–78	50–85
Изофлекс-2	—	0,40	1230	1090	450	350
Гибкий стеклослюдопласт	ГИТ-Т-ЛСБ	0,45	260–600	220–620	95–330	87–380
	ГИТ-ЛСБ-ЛСЛ	0,55	210–480	270–470	140–260	140–260
Стеклолакорезинослюдопласт	ГИТ-ТрТр	0,58	270–460	250–360	94–260	102–240
Пленкосинтокартон	ПСК-Л	0,20–0,25	150–180	160–190	40–70	50–20
	ПСК-Л	0,40	720–850	—	—	—
	ПСК-Ф	0,28–0,30	310	300–310	100	100–120
	ПСК-Ф	0,38–0,40	850–1550	880–1580	380–760	380–900
Тривольтерм	P	0,20	180–320	—	70–130	—
	P	0,35	960	—	—	—
	N	0,25	280–380	400	90	125
Пленкосинтокартон	NeN 200	0,20	730	—	—	—
	Ne 200	0,20	730	—	—	—
	NeN 300	0,30	1100	—	—	—
	Изоном	0,36	1030	1070	370	460
	NTN 2102	0,38	990	1020	400	500
	NTN 373	0,38	640	620	300	360
	NT 105	0,40	870	960	550	440

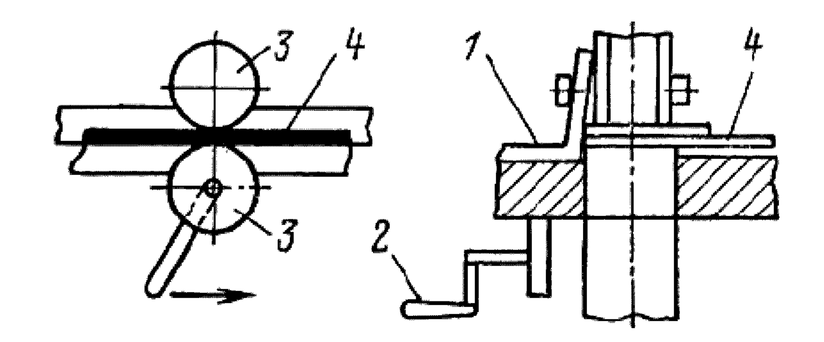


Рис. 9. Эскиз установки для фальцевания: 1 — упор; 2 — рукоятка; 3 — валики; 4 — образец

Таблица 10

Стойкость к фальцеванию (изменение пробивного напряженя)

Материал	Марка	Средняя толщина, мм	Пробивное напряжение, кВ	
			в исходном состоянии	поле фальцевания
Пленка ПЭТФ Имидофлекс Пленко-синтокартон	Диафоль (Япония)	0,10	16,0	13,5
	ЗПНБ	0,18	14,3	11,3
	ПСК-Л	0,19	16,0	14,7
	ПСК-Л	0,20	16,0	14,7
	ПСК-Ф	0,25	19,0	18,0–18,2
	ПСК-ФК	0,25	19,0	18,0–18,2
	NTN 373 (Япония)	0,37	23,0	19,0–19,5
	ПСК-Ф	0,37	24,0–26,0	20,0–26,0
	ПСК-Ф	0,40	26,0	26,0
	NT 105 (Япония)	0,41	17,5	14,1
Тривольтерм	—	0,20	11,1	11,1
Гибкий слюдинит	Г2СП	0,20	6,0–6,6	2,6–5,7
Гибкий стекло-слюдопласт	ГИТ-ЛСБ-ЛСЛ	0,30	11,4–14,0	2,6–6,3
	ГИТ-ЛСБ-ЛСБ	0,55	20,0–23,0	5,0–12,6
Стеклолако-резинослюдопласт	ГИТ-Тр-Тр	0,58	15,0–19,7	5,0–7,3
Гибкий миканит	ГФС-ТТ	0,25	6,4	2,1–2,3
	ГФК-ТТ	0,30	6,5	2,5–2,7

пуская через вращающиеся валики на 180°. Место изгиба должно быть у упора. Затем вручную в месте фальцевания образцы изгибают на 360° и снова пропускают через валики фальцера. Двойное фальцевание производят в четырех направлениях (параллельно сторонам образца). Пробивное напряжение определяют в центре, где не производили фальцевание, и в местах, подвергнутых фальцеванию (табл. 10).

Перед испытанием на стойкость к фальцеванию путем определения прочности на разрыв образцы шириной 15 и длиной не менее 240 мм фальцуют в поперечном направлении сначала с одной стороны, а затем с обратной. Примеры полученных значений приведены в табл. 11.

Гибкие композиционные материалы следует испытывать и на расслаиваемость, помещая образец размером 25×200 мм в приспособление (рис. 10) под нагрузку 50±1 Н на 1–3 с. Для проверки склонности к слипанию и вытеканию лака с торцов пять образцов размером 25×200 мм складывают в стопу, которую помещают на ров-

Таблица 11

Стойкость гибких материалов к фальцеванию (изменение механической прочности)

Материал	Марка	Толщина, мм	Средняя разрывная нагрузка, Н	
			до фальцевания	после фальцевания
Гибкий стеклослюдопласт	ГИТ-Т-ЛСБ	0,45	316–650	22–176
Гибкий стеклослюдопласт	ГИТ-ЛСБ-ЛСЛ	0,55	390–1010	34–194
Стеклолакорезинослюдопласт	ГИТ-ТрТр	0,58	690–1220	84–214
Лакостекломиканит	ГФК-Т-ЛСК	0,55	400–510	64–118
Полиимидная пленка	ПМ	0,05	152–172	146–154
Пленка	ПЭТФ	0,1	230–240	210
Пленкосинтокартон	ПСК-Ф	0,25	370–500	350–500
		0,30	430–470	400–460
		0,40	696–790	690–770
		0,20	250–296	216–270

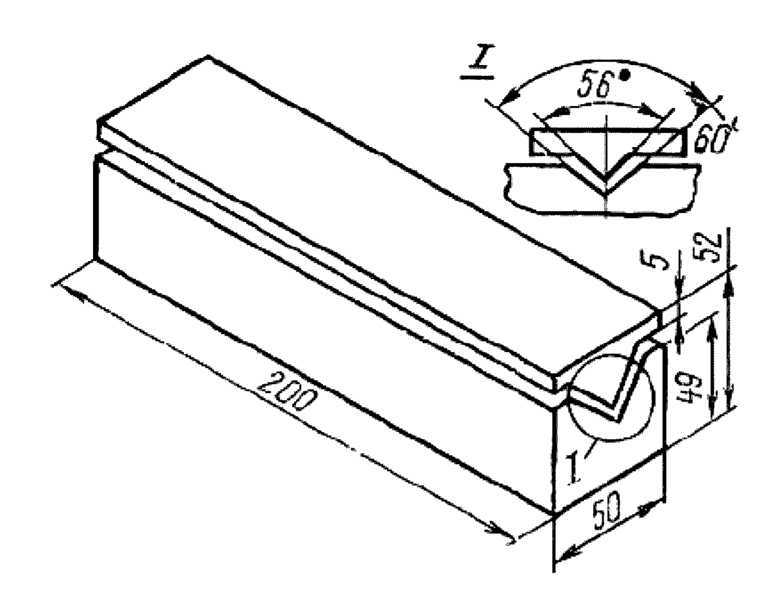


Рис. 10. Приспособление для определения расслаиваемости композиционных слюдопластов

ную гладкую поверхность и сдавливают через пластину нагрузкой 50±1 Н в течение 30 мин.

2.1.2. Оценка ленточных материалов

Ленточные материалы обычно наносят на токоведущие части разной конфигурации с различным нахлестом (обычно вполнахлеста).

При изолировании на ленты действуют растягивающие и надрывающие усилия (но несколько иначе, чем на гибкие материалы). Так как растягивающие усилия играют превалирующую роль, то для таких материалов важно знать не только разрывную нагрузку, но и изменение электрической прочности при растяжении. Испытания лент на надрыв производятся в специальных приспособлениях (рис. 11 и 12).

Очень важным параметром является гибкость изоляционных лент. Она оценивается по растягивающей нагрузке, при которой достигается определенное относительное удлинение образца, или по усилию, необходимому для изгибания в специальном приборе.

Прибор состоит из пяти роликоподшипников, размеры и расположение которых показаны на рис. 13. С помощью полоски из политетрафторэтилена толщиной 12 мкм и шириной 5 мм находят минимальную нагрузку, требуемую для приведения роликов в движение

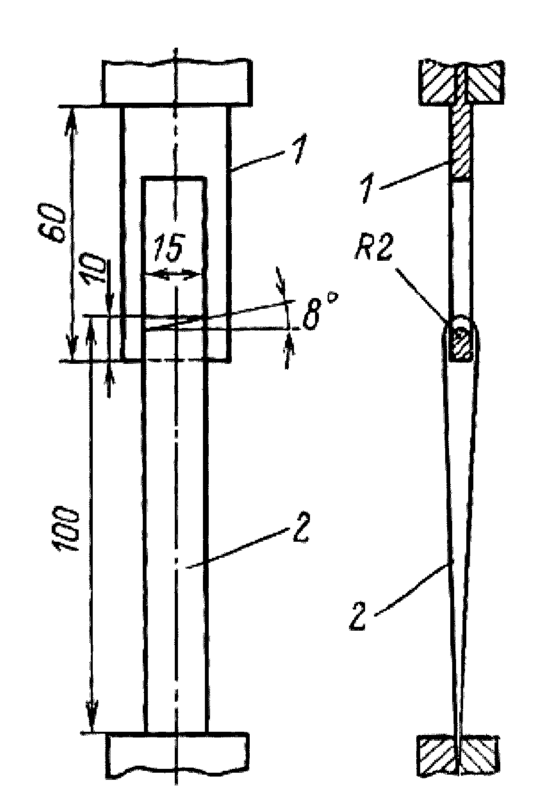


Рис. 11. Скоба для определения сопротивления надрыву слюдяных лент:
1 — скоба; 2 — образец

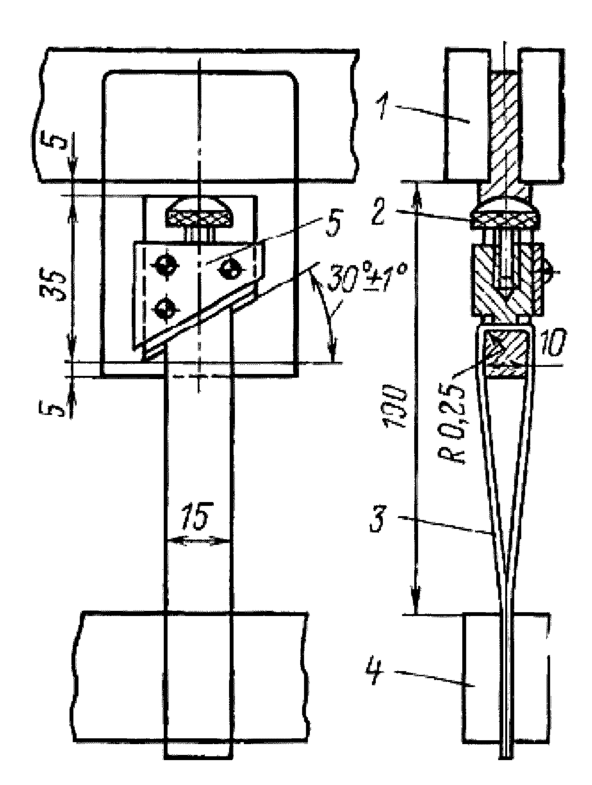


Рис. 12. Скоба для определения сопротивления надрыву стеклотканей и лакотканей: 1 — верхний зажим; 2 — винт; 3 — образец; 4 — нижний зажим; 5 — скользящий ползун

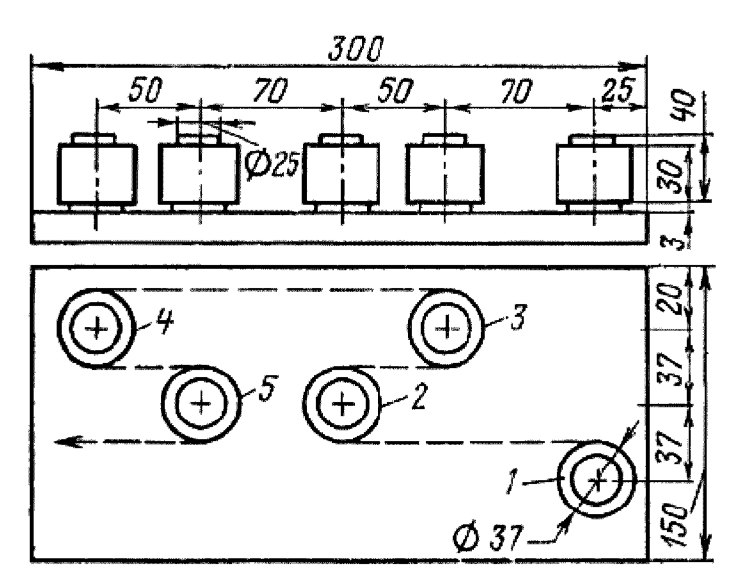


Рис. 13. Приспособление для испытаний лент на эластичность:
1–5 — номера роликов

(она не должна превышать 350 Н, а разница в замерах не должна быть более 10 Н). Для испытаний образец шириной 25 мм и длиной около 1 м закрепляют на ролике 1 склеивающей лентой и, поворачивая ролик по часовой стрелке, наматывают на него образец, после чего образцом обходят остальные ролики и к концу его прикрепляют груз, который приводит образец в движение со скоростью 1 м/мин. Результатом испытаний является разность нагрузок, полученных при испытании образца и пленки. Гибкость оценивается в ньютонах на метр ширины ленты. Ленты на основе термореактивных связующих испытывают на способность запекаться – определяют такие параметры, как текучесть смолы при отверждении и время ее желатинизации. Для определения текучести складывают ленту в пачку толщиной 2 и длиной 50 мм. Если материал в рулонах или листах, то на на некотором расстоянии от краев вырезают образцы размером 50×50 мм и складывают их в пачку толщиной 2 мм. Содержание связующих в материале должно быть установлено заранее. Затем пачку взвешивают и помещают между пластинами в центр пресса. Пресс и пластины должны быть нагреты до температуры, считающейся оптимальной при изготовлении обмоток (с точностью ±2 °С). К пачке прикладывают нагрузку 2,5 кН, под которой она должна находиться в течение 15±1 мин. Для лент, имеющих меньшую площадь, нагрузка соответственно другая. С торцов пачки аккуратно удаляют выступающую смолу и после выемки из пресса определяют толщину пачки и ее массу. Текучесть смолы при выбранной температуре определяют как отношение разности полученной и исходной массы пачки к исходной массе и как отношение разности начальной и конечной толщины пачки к начальной. Для установления технологических параметров лент термореактивном связующем важно определить время его желатинизации. Для этой цели от ленты отрезают 10 образцов размерами 100×25 мм (в случае меньшей ширины ленты берут образцы длиной, равной ее ширине) и располагают их между пластинами так, чтобы концы выступали на 5 мм за их края. Пачку пластин с образцами помещают в пресс, нагретый до 160±5°С, и прикладывают давление 1 МПа/м. Тонкой проволокой определяют степень желатинизации выделившейся смолы, которую оценивают временем от момента помещения пачки в пресс до момента желатинизации смолы.

Кроме того, эти материалы следует испытывать в образцах, находящихся в запеченном состоянии. После запекания образцов толщиной 3±1, шириной от 10 до 25 и длиной не менее 75 мм определяют предел прочности и модуль упругости при изгибе, температуру прогиба при нагрузке, соответствующей 10 % предела прочности при изгибе. Для определения зависимости прогиба от температуры применяют специальный прибор (рис. 14), в ванну которого устанавливают опытные образцы толщиной 3±0,1, шириной 12,5 и длиной 150 мм. Нагрузка прилагается перпендикулярно плоскости образца. Через 2 мин после приложения нагрузки устанавливают отклонение стрелки индикатора от нулевой точки. Затем образцы нагревают со скоростью 2 °С/мин и измеряют прогибы, начиная с 30 °С, до температуры, при которой наблюдается предельно допустимая деформация. Строят зависимость прогиба от температуры. Первый образец используют для наладки приспособления и получения грубых характеристик. Температуру изгиба оценивают как среднюю арифметическую температуру прогиба второго и третьего образцов. При необходимости определяют электрические характеристики запеченных образцов.

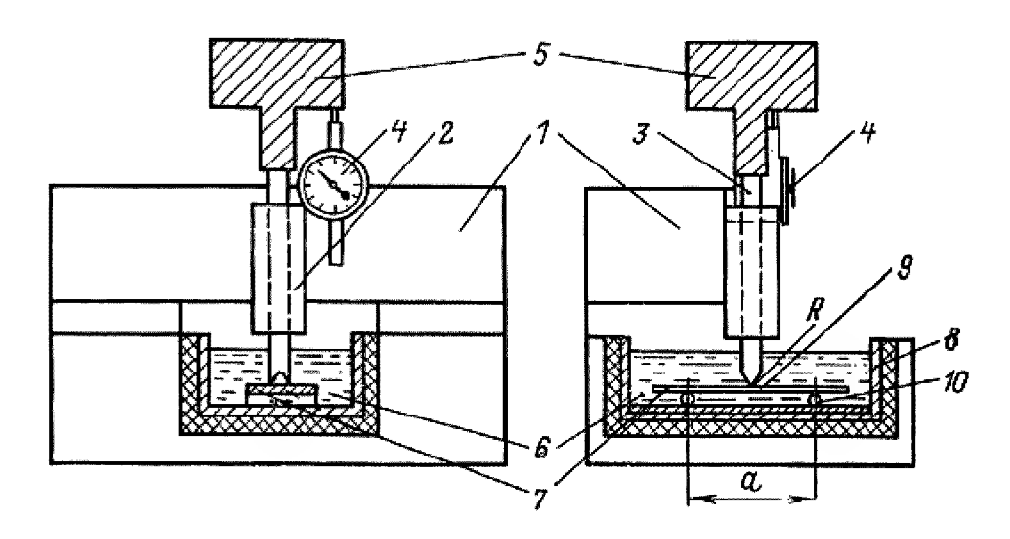


Рис. 14. Приспособление для определения зависимости прогиба под нагрузкой от температуры: 1 — суппорт; 2 — втулка; 3 — шток; 4 — индикатор прогиба; 5 — груз; 6 — масляная ванна; 7 — образец; 8 — теплоизоляция; 9 — термопара; 10 — опоры;
a=15÷32 мм — размер испытуемого образца; R=1,5÷3,2 мм

2.1.3. Оценка листовых материалов на термореактивных связующих

Основными параметрами, характеризующими технологичность формовочных листовых материалов на термореактивных связующих, являются формуемость при повышенной температуре, текучесть при отверждении, желатинизация. Методы испытаний такие же, как и для лент на термореактивных связующих. Образцы в запеченном состоянии подвергаются тем же испытаниям, что и образцы из лент на основе термореактивных связующих.

2.1.4. Оценка обмоточных проводов

Обмоточные провода предназначены для изготовления обмоток электрических машин, аппаратов и приборов.

Изготавливают с жилами из проводниковых материалов (меди, алюминия), а также сплавов большого удельного сопротивления (манганин, константан, нихром и др.).

Обмоточные провода разделяются на три группы: с эмалевой изоляцией; с волокнистой или комбинированной эмалево-волокнистой изоляцией; с пленочной изоляцией.

Изоляция обмоточных проводов:

– эмалевая (гибкое лаковое покрытие) имеет меньшую толщину (0,007–0,065 мм), что позволяет в тот же объем обмотки заложить большее количество проводов и тем самым увеличить мощность электрической машины или аппарата;
– бумажная, пропитанная минеральным маслом, для повышения механической прочности покрывают хлопчатобумажной или капроновой пряжей (для обмотки трансформаторов);
– волокнистая имеют большую толщину (0,05–0,17 мм), пропитанная лаками или компаундами имеет большую электрическую прочность;
– эмалево-волокнистая, волокнистая изоляция наносится поверх эмали, такая изоляция обеспечивает повышенную механическую и электрическую прочность (для обмотки тяговых, шахтных электродвигателей и электрических машин и аппаратов, которые эксплуатируются в тяжелых условиях и требуют защиты эмалевой изоляции).

Наиболее распространенной группой обмоточных проводов являются эмалированные провода, которые имеют более тонкую изо-

ляцию, что позволяет увеличить в электрических машинах коэффициент использования паза. К обмоточным проводам предъявляется ряд требований, контролируемых специальными испытаниями.

Эластичность — определяется способностью изоляции выдерживать нагрузку на растяжение вплоть до разрыва провода без повреждений в изоляции. Для проводов с относительно большим диаметром (более 0,4) эластичность проверяется способом навивки провода на стержень определенного (по стандарту для данного провода) диаметра, при этом в изоляции не должны возникать трещины.

Стойкость к тепловому удару — оценивается способностью изоляции выдерживать быстрое изменение температуры при одновременном нагружении изоляции на изгиб (обмоточный провод навит в спираль определенного диаметра).

Стойкость изоляции к истиранию и ее адгезия к проводнику

Первая характеристика определяется на скребковом приборе путем истирания изоляции стальной иглой при ее возвратно-поступательном перемещении по поверхности изоляции.

Термопластичность изоляции — это характеристика, определяемая только для эмалевой изоляции, представляет собой способность размягчаться при повышенных температурах.

Пробивное напряжение — один из важнейших параметров, определяющих работоспособность проводов. Все перечисленные свойства изоляции обмоточных проводов обусловлены условиями изготовления самой обмотки (изгибами, натяжениями и т. д.) и эксплуатационными воздействиями. Например, определение стойкости к тепловому удару необходимо для оценки работоспособности изоляции в экстремальных условиях; требование стойкости изоляции к истиранию учитывает такие эксплуатационные воздействия, в результате которых проводники смещаются относительно друг друга; оценка термопластичности эмалевой изоляции позволяет исключить размягчение изоляции и как следствие этого — замыкания витков обмотки; уровень пробивного напряжения изоляции обмоточных проводов в машинах со всыпной обмоткой определит их стойкость к коммутационным перенапряжениям.

Для производства эмалей используются смолы, сохраняющие в полимеризованном состоянии эластичность. С поливинилацеталевой и полиэфирной изоляцией выпускаются также алюминиевые

провода ПЭВА и ПЭТВА, их ТИ выше и составляет у ПЭВА — 130 °C, у ПЭТВА — 155 °C. Повышенная нагревостойкость объясняется большей пассивностью алюминия по отношению к изоляции по сравнению с медью в процессе теплового старения. По электрическим параметрам изоляции провода марки ПЭТВА и ПЭТВ равноценны, однако стойкость к истиранию у алюминиевых проводов ниже.

Для электродвигателей, намотка которых производится механизированным способом, применяются круглые провода марок ПЭТВМ, ПЭТМ с диаметром 0,25–1,4 мм. Они имеют несколько большую толщину изоляции, повышенную механическую прочность и стойкость к тепловому удару.

Все перечисленные свойства изоляции обмоточных проводов обусловлены условиями изготовления самой обмотки (изгибами, натяжениями и т. д.) и эксплуатационными воздействиями. Например, определение стойкости к тепловому удару необходимо для оценки работоспособности изоляции в экстремальных условиях; требование стойкости изоляции к истиранию учитывает такие эксплуатационные воздействия, в результате которых проводники смещаются относительно друг друга; оценка термопластичности эмалевой изоляции позволяет исключить размягчение изоляции и как следствие этого — замыкания витков обмотки; уровень пробивного напряжения изоляции обмоточных проводов в машинах со всыпной обмоткой определит их стойкость к коммутационным перенапряжениям.

При изготовлении обмоток провода подвергают растяжению, истиранию поверхности, изгибанию, а также воздействию пропиточных составов при температуре пропитки и повышенных температур при сушке после пропитки. При истирании в изоляции могут появиться дефекты и может снизиться ее пробивное напряжение. Более сложные процессы происходят в случае растяжения или изгибания эмалированных проводов: возможно не только резкое снижение пробивного напряжения (табл. 12), но и уменьшение стойкости к растворителям пропиточных лаков и особенно срока службы обмотки. В основном степень ухудшения этих свойств зависит от химического состава эмалевых пленок. Резкое снижение пробивного напряжения от растяжения может происходить и в случае нарушения режима эмалирования (недозапекания эмалевой пленки) или низкой адгезии ее к проводнику.

Таблица 12

Электрические свойства эмалевой изоляции проводов

Марка провода	Диаметр, мм	Толщина изоляции, мм	Пробивное напряжение (в скрутках), кВ		Пробивное напряжение проводов, кВ							
					в исходном состоянии		растянутые на					
							5 %		10 %		15 %	
					среднее	минимальное	среднее	минимальное	среднее	минимальное	среднее	минимальное
ПЭТМ	1,16	0,08	9,1	4,0	3,3	2,4	2,3	1,0	1,3	0,7	1,0	0,5
ПЭТ-200	1,45	0,07	11,5	7,5	6,2	1,4	3,7	1,4	4,3	2,0	3,4	1,0
ПЭТ-155	1,56	0,08	9,5	5,0	3,8	1,0	2,6	0,5	1,7	0,5	1,0	0,5
ПЭФ-155	1,0	0,08	12,7	5,0	5,9	3,6	5,7	4,0	6,0	2,0	5,8	2,6
ПЭТВ	1,0	0,08	6,4	3,6	6,5	2,2	5,4	1,4	5,4	1,2	5,0	1,0

Влияние растворителей и пропиточных составов оценивают после выдержки проводов в течение заданного времени при заданной температуре в составе путем определения стойкости эмали к истиранию в растянутом и нерастянутом состояниях провода. Стойкость к кратковременному воздействию повышенных температур оценивают по стойкости к тепловым ударам и термопластичности изоляции провода. Однако для полной оценки влияния растяжения, повышенной температуры и пропиточных составов необходимо проведение длительных циклических испытаний. Важными технологическими параметрами являются относительное удлинение при разрыве провода и его упругость.

Так как все перечисленные методики испытаний эмалированных и стекловолокнистых проводов имеются в соответствующих ГОСТ, за исключением методики определения упругости, то приводим только ее. Прибор для определения упругости прямоугольных проводов путем оценки угла отдачи показан на рис. 15. Он состоит из двух подвижных рычагов с роликами и барабана со шкалой в градусах. Образец длиной 400 мм помещают в канавку под роликами

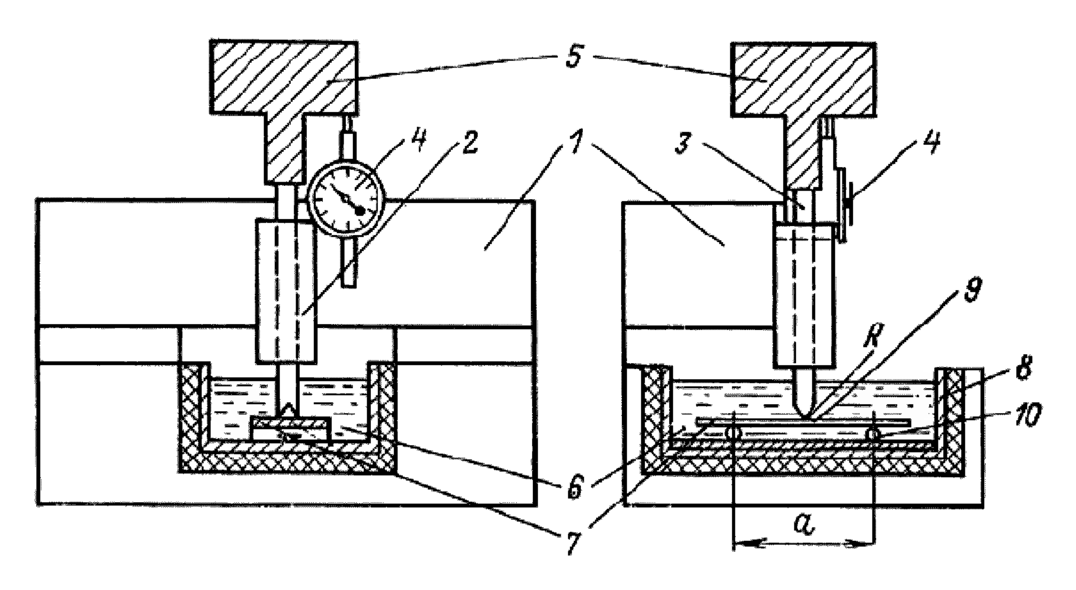


Рис. 15. Приспособление для определения упругости прямоугольного провода: 1 — рычаг; 2 — ролик; 3 — образец; 4 — барашек; 5 — шпиндель; 6 — втулка крепления шпинделя; 7 — станина

так, чтобы оставались свободные концы длиной около 150 мм, и изгибают с помощью рычагов так, что рычаги образуют угол 30° по отношению к начальному положению. Затем образец осторожно освобождают и фиксируют остаточный угол в градусах.

2.1.5. Новые направления в разработке эмалированных проводов

Лаки, используемые для производства эмалевой изоляции, представляют собой 18–40-процентный раствор лакоосновы в растворителе. В связи с токсичностью растворителей возникают проблемы, связанные с необходимостью охраны окружающей среды. Для производства эмалированных проводов требуются специализированные помещения. В связи с повышающимися с каждым годом требованиями к защите окружающей среды проводились работы по созданию новых лаков с минимальной токсичностью. Так как токсичность эмаль-лаков в основном определяется растворителем, то наиболее перспективным является получение изоляционной пленки на проводнике без применения растворителей. В отечественной практике для производства эмаль-проводов без растворителей применяется полиэфирная смола ТС-1, имеющая следующую структурную формулу элементарного звена, приведенную на рис. 16.

$-CH_2-CH_2-OOC-C_6H_4-OOC_2-CH-CH_2\ CH_2$

$\quad\quad\quad\quad\quad\quad\quad\quad\quad\quad\quad\quad\quad\ |$

$\quad\quad\quad\quad\quad\quad\quad\quad\quad\quad\quad -\left[\begin{matrix} OH \\ OOC-C_6H_4-COO \end{matrix}\right]_n$

Рис. 16. Структурная формула полиэфирной смолы ТС-1

При применении этой смолы вязкотекучее состояние, необходимое для нанесения материала на проволоку, достигается не растворением пленкообразующего вещества, а его расплавлением. Полученные эмалированные провода по своим свойствам идентичны проводам с изоляцией на основе полиэфирных лаков типа ПЭ-943 или ПЭ-933. Вязкость, необходимая для нанесения смолы ТС-1 на проволоку, получается при нагревании до 180–185 °С.

Из расплава получены также эмали из полиэфиримидной смолы марки ПЭИ-25. Преимущества способа эмалирования из расплава на примерах полиэфиримидной смолы и полиэфиримидного лака, по данным фирмы «Д-р Бек» (Германия), представлены в табл. 13.

Вторым направлением снижения токсичности эмаль-лаков является создание лаковых систем с повышенным содержанием пленко-

Таблица 13

Преимущества способа эмалирования

Свойства	Полиэфиримидная смола (расплав)	Полиэфиримидный лак
Срок хранения	Не ограничен	1 год
Стабильность при 180 °С	10 суток	—
Содержание лакоосновы, %	90	Около 30
Потери теплоты при сгорании	Ничтожно малы	Обычны для процесса эмалирования
Необходимость каталитического сжигания отходящих газов	Не требуется	Требуется
Число проходов проволоки через ванну для наложения покрытий	4	8
Запах	Отсутствует	Имеется
Степень пожароопасности	Отсутствует	Имеется

образующих веществ — порядка 50 %. Это достигается как применением специальных растворителей, так и модификацией рецептуры смолы, составляющей основу лака. В будущем возможно создание лаков, вообще не содержащих дефицитные и токсичные крезолы.

Третье направление уменьшения токсичности — создание водорастворимых полимеров, водных коллоидных систем и т. д. Нетоксичные составы в ряде случаев представляют собой водные дисперсии, в которых частицы смолы имеют размер до 3 мкм, либо коллоидные растворы, где размеры частиц основы значительно меньше (0,001–0,1 мкм). Применение таких составов требует тщательного контроля технологии и в ряде случаев приводит к снижению скорости эмалирования проволоки.

Провода с волокнистой и эмалево-волокнистой изоляцией

Для повышения электрической прочности и надежности изоляции проводов относительно больших сечений на них наносится волокнистая оплетка, скрепляемая пропиточным лаком. Оплетка выполняется из пряжи хлопчатобумажной (провода марки ПБД), шелковой (ПШО) или стеклянной (ПСД). В электрических машинах наиболее широко используются провода со стекловолокнистой изоляцией, которые отличаются повышенной нагревостойкостью, электрической и механической прочностью и стойкостью к кратковременному превышению температуры. Основные марки проводов этого типа с указанием области применения представлены в табл. 14.

Индекс Т в марке провода означает, что для изоляции используется утоненное стекловолокно; индекс Л указывает на наличие на поверхности провода дополнительного слоя лака; П — проводник полый (для машин с водяным охлаждением).

Изоляция проводов состоит из стеклянных нитей, наложенных двумя слоями с подклейкой и пропиткой соответствующим лаком. Все провода, за исключением ПСДТ, ПСДТ-Л и ПСД, выпускаются как круглого, так и прямоугольного сечения. Провода ПСДТ и ПСДТ-Л — только круглые, ПСДП — только прямоугольный. Пробивное напряжение различных обмоточных проводов со стекловолкнистой изоляции мало отличается, и его минимальное значение находится в пределах 300–600 В. Это объясняется тем, что пробой изоляции происходит по имеющимся воздушным промежуткам при

Таблица 14

Основные марки проводов, характеристики и область применения

Марка	Пропиточный лак	Диаметр, мм	Двойная толщина, мм	ТИ, °С	Область применения
ПСД	Глифталемасляный или глифталевый	0,5–5,0	2,23–0,33	130	Высоковольтные электродвигатели
ПСД-Л	Глифталемасляный или глифталевый	1,0–6,0	2,23–0,33	130	Тяговые электродвигатели
ПСДТ-Л	То же с подклеивающим лаком	0,315–2,12	2,23–0,33	130	
ПСДК	Кремнийорганический	0,5–5,0	—	180	Электродвигатели химстойкого и морского исполнения
ПСДКТ	Кремнийорганический	0,315–2,12	2,23–0,33	180	
ПСДКТ-Л	То же с подклеивающим лаком	0,315–2,12	—	180	
ПСД-1	Эпоксидный лак ЭП-934	—	0,27–0,48	155	Турбо- и гидрогенераторы
ПСДП	Эпоксидный лак ЭП-934	—	0,4–0,48	155	

приблизительно одинаковых толщинах изоляции. Для создания более надежной изоляции обмоточных проводов, работающих в тяжелых условиях эксплуатации (обмотки электроподвижного состава) или рассчитанных на большой ресурс (до 200 000 ч), изготавливаются комбинации из эмалевой и стекловолокнистой изоляции. К ним относится провод ПЭТВСД, предназначенный для длительной работы при 155 °С. Диапазон диаметров круглых проводов 0,85–5,0 мм, диапазоны сечений прямоугольных 2,5–25,2 мм^2 Двойная толщина изоляции провода составляет 0,35–0,47 мм. Пробивное напряжение изоляции не ниже 800—1000 В.

Обмоточные провода с пленочной изоляцией

Обмоточные провода с пленочной изоляцией используются в погружных двигателях, обмотки которых подвергаются воздействию жидкой среды.

Условия работы погружного электродвигателя в скважине небольшого диаметра (до 425 мм) определяют особенности его конструк-

ции — малый диаметр при большой длине, полностью закрытый паз. Подобная конструкция паза статора требует изготовления обмотки методом многократной протяжки провода, поэтому изоляция провода должна иметь высокую механическую прочность.

Один из первых типов обмоточных проводов для таких условий — провод с комбинированной эмалевой и пленочноволокнистой изоляцией, использованный для обмоток с напряжением 1000–2000 В, ПЭТВПДЛ-3 и ПЭТВПДЛ-4. Изоляция этих проводов состоит из слоя полиэтилентерефталатной эмали, трех (четырех) слоев лавсановой пленки и двух слоев лавсановой нити с подклейкой и пропиткой полиэфирной смолой. Недостатком этих проводов является низкая нагревостойкость, их температурный индекс — 120 °С. Провода типа ПЭТВПДЛ успешно заменяются нагревостойкими проводами со спеченной пленочной фторопластовой и полиимидно-фторопластовой изоляцией, которые могут эксплуатироваться в водозаполненных электродвигателях на напряжение 380 В, работающих в среде воды и пластовой жидкости при температуре +180 °С и давлении до 20 МПа. Некоторые марки нагревостойких обмоточных проводов для погруженных двигателей представлены в табл. 15.

Аналогичные провода выпускаются прямоугольного сечения, например для якорных обмоток высоконагруженных машин постоянного тока (ППИП, ППИПК).

Из таких проводов изготавливаются шаблонные секции, выпечка которых производится при 300–350 °С. При этой температуре происходит расплавление слоя фторопласта на поверхности пленки,

Таблица 15

Нагревостойкие обмоточные провода

<table>
<tr><th>Марка</th><th>Состав изоляции</th><th>Диаметр провода, мм</th><th>Двойная толщина, мм</th><th>Uпрt, кВ</th><th>Средний ресурс, ч</th></tr>
<tr><td>ППФ</td><td>Ленточный фторопласт-4</td><td>1,7–3,15</td><td>0,9–1,0</td><td>3,5</td><td rowspan="2">В маслозаполненных двигателях — 20000; в водозаполненных — 5000</td></tr>
<tr><td>ППФИ</td><td>Ленточный фторопласт + полиимидно-фторопластовая пленка (ПМФ-351)</td><td>1,7–3,15</td><td>0,9–1,0</td><td>3,5</td></tr>
<tr><td>ППИ</td><td>Спеченная изоляция ПМФ-351</td><td>1,7–3,15</td><td>0,5</td><td>12</td><td>25000</td></tr>
</table>

что обеспечивает оклейку проводников и влагозащиту конструкции. Применение незащищенной полиимидной пленки в погружных машинах, где возможно проникновение воды в обмотку, недопустимо из-за низкой гидролитической стойкости полиимида.

2.1.6. Оценка изоляционных трубок и выводных проводов

Электроизоляционные трубки используются в качестве дополнительной изоляции и защиты проводов, находящихся под напряжением. Трубки из ПВХ применяются до 1000 В, при более высоком напряжении используются, изоляционные трубки из других материалов например, трубки из стеклошнурчулка. Такие трубки выполняются методом плотного плетения с последующим покрытием таких изоляционных материалов, как кремнийорганической резины. У них также шире температурный эксплуатационный диапазон:

1. Трубки силиконовые электроизоляционные марки ТКР изготавливаются из высококачественных резиновых кремнийорганических смесей. Обладают высоким качеством. Трубки марки ТКР широко используются в электротехнической промышленности для изоляции монтажных и выводных электропроводов. Электроизоляционные силиконовые трубки для изоляции пучков проводов электрооборудования, радиоаппаратуры, концевой заделки.

Трубка электроизоляционная применяется для ремонта высоковольтных кабелей, токоведущих элементов и различных электротехнических устройств. Условия работы силиконовых трубок марки ТКР: напряжение до 1200 В постоянного и переменного тока 500 Гц при температуре от –60 °С до +180 °С (класс нагревостойкости — Н по ГОСТ 8865).

2. Электроизоляционные термостойкие трубки ТРТ применяются в промышленности для изоляции монтажных и выводных электропроводов оборудования, токоведущих элементов радиоаппаратуры электротехнических устройств, функционирующих при напряжении 1200–690 В постоянного тока, частотой до 500 Гц переменного тока, температуре от –60 до +200 °С. Допустимая температура эксплуатации электроизоляционных трубок ТРТ до + 250 °С в течение 3600 ч.

3. Трубки самозатухающие термостойкие, устойчивые к воспламенению марки ТТС-СВ. Трубки ТТС-СВ используются в промыш-

ленности для дополнительной и основной изоляции монтажных и выводных проводов электрического оборудования, токоведущих элементов всевозможных электротехнических устройств, которые работают при напряжении 1200 и 690 В переменного и постоянного тока частотой до 500 Гц, находящихся в условиях повышенных температур.

Трубки самозатухающие термостойкие ТТС-СВ применяются также в качестве защитных оболочек, устойчивых к нагреву проводов, для подключения трубчатых электронагревателей (ТЭН), защиты пучка изолированных проводов, либо одиночных проводов с оболочкой из менее термостойких материалов и т. п.

Трубки термостойкие выпускаются 2-х типов, в зависимости от температуры использования:

– Термостойкая трубка тип I — от –50 °С до +250 °С;

– Термостойкая трубка тип II — от –50 °С до +200 °С.

4. Трубки электроизоляционные гибкие марки ТКСП

Трубки электроизоляционные ТКСП представляет собой конструкцию, которая состоит из шнур-чулка плотного плетения (стеклонить), аппретированного кремнийорганическим лаком и покрытого оболочкой из кремнийорганической резины. Электроизоляционные трубки из кремнийорганической резины широко применяется дляизоляции выводных и монтажных проводов электрооборудования. Трубки ТКСП нашли свое применение в различных токоведущих элементах электротехнических устройств и радиоаппаратуры, работающих при температуре от –60 °С до +180 °С и напряжением до 660 В постоянного и переменного тока частотой до 500 Гц. Трубки электроизоляционные совершенно нетоксичны, невзрывоопасны, трудногорючи при температуре окружающей среды.

Класс нагревостойкости трубок электроизоляционных — Н по ГОСТ 8865.

5. Трубки электроизоляционные гибкие армированные ТТСП-СВ. Электроизоляционные трубки ТТСП-СВ, стойкие к воспламеняемости.

Армированные трубки ТТСП-СВ изготавливаются из шнур-чулка плотного плетения из стеклонити, аппретированного лаком из кремнийорганики и покрытого оболочкой из термостойкой силоксановой резиновой смеси, устойчивой к воспламенению и самозатухающей.

Электроизоляционные трубки применяют в промышленности для изоляции монтажных и выводных проводов электрооборудования, токоведущих элементов различных электротехнических устройств и радиоаппаратуры, работающей в ненапряженном состоянии при температуре от –50 °С до +250 °С и напряжении до 690 В постоянного и переменного тока частотой до 500 Гц.

Трубки электроизоляционные гибкие армированные ТТСП-СВ используются в качестве защитных оболочек для нагревостойких проводов, для подключения ТЭН, защиты одиночных либо пучка изолированных проводов из менее термостойких материалов и т. п.

Методы оценки изоляционных трубок и выводных проводов основываются не только на тех изменениях, которые они претерпевают в процессе изготовления обмотки и эксплуатации электрической машины, но и на их склонности к тем или иным специфическим дефектам. Поэтому для изоляционных трубок в виде стеклолакочулков и трубок из пластикатов и резин, полученных экструзионным путем, акцентрирование внимания на том или ином методе оценки должно быть различным. Например, для стеклолакочулков обязательно определение эластичности, а для трубок из кремнийорганических и фторорганических каучуков это свойство заведомо высокое, но следует оценить их упругость, твердость, чего не требуется для стеклокаучуков. Электроизоляционные трубки в процессе изготовления обмоток могут претерпевать следующие технологические воздействия: истирание проводом, изгибание вместе с токоведущими проводниками, сжатие при увязывании схемы, проколы, удары, воздействие пропиточных составов и высокой температуры при сушке, а также пайке схем. Поэтому помимо определения основных параметров — электрической прочности сопротивления разрыву, относительного удлинения при разрыве, методы которых указаны в ГОСТ, должны быть проведены испытания на стойкость трубок к технологическим воздействиям. Для определения гибкости трубок три образца длиной по 150 мм после нормализации в течение суток при 23±5 °С на ровной пластине испытывают в приборе (рис. 17), где трубку надевают на нить, прикрепленную к поворотному цилиндру, и закрепляют с одного конца на цилиндре. К нити подвешивают груз определенной массы в зависимости от гибкости

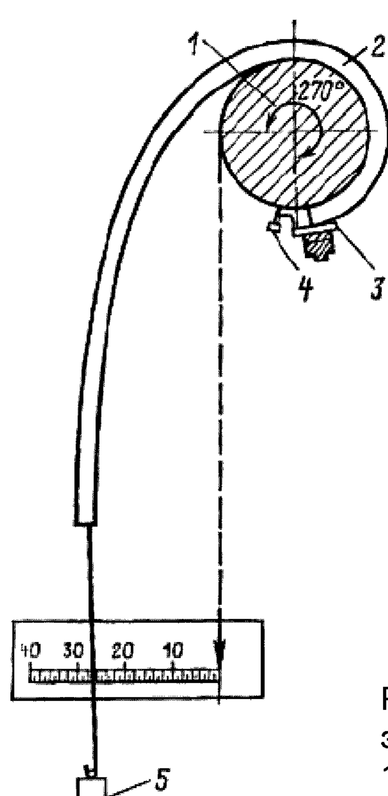


Рис. 17. Приспособление для определения эластичности трубок:
1 — вращающаяся оправка; 2 — образец;
3 — зажим образца; 4 — зажим нити; 5 — груз.

трубок (например, для ТРФ, ТКР, ПВ-50, фторопластовой — 300 г). С помощью прорези на линейке, где нанесена шкала, устанавливают напротив нити нулевое значение шкалы. Затем цилиндр приводят в движение с такой скоростью, чтобы он повернулся на 270° (до упора в приспособлении) в течение 10 с и отклонился. Значение отклонения отсчитывают через 30 с после окончания вращения цилиндра и вычитают из него значение толщины стенки трубки. Испытание трубок на продавливание проводят на восьми образцах в исходном состоянии, при повышенной температуре и после воздействия растворителей.

Предварительно в образцы трубок вставляют проволоку. Затем на нагревостойкую изолирующую пластину (например, стеклотекстолитовую) параллельно укладывают два образца с расстоянием между стенками в свету не менее 50 мм. На них на таком же расстоянии один на другой под прямым углом кладут два других образца, которые накрывают изоляционной пластиной. На пластину ставят груз 50 Н и через 30 мин к каждой паре проволок от соприкосающих-

ся трубок поочередно подают напряжение до пробоя или испытательное в течение 1 мин.

Для определения способности трубок к усадке без растрескивания их надевают на специальную ступенчатую цилиндрическую оправку с диаметрами ступеней, равными 0,5 и 0,75 внутреннего диаметра трубки до усадки, после чего подвергают воздействию температуры усадки. У армированных трубок адгезию чулка в эластомерной оболочке определяют на трубках внутренним диаметром 5 мм и более.

Длина образцов 100 мм. Испытания производят на разрывной машине, номинальное значение шкалы которой должно превышать не более чем в 5 раз измеряемую нагрузку при расслоении. Шкала нагрузок разрывной машины должна позволять отсчитывать измеряемые нагрузки при расслоении с точностью ±1 %. Скорость движения нижнего зажима при испытании должна быть 200±20 мм/мин. Образцы, взятые на испытание, разрезают вдоль, затем вручную отделяют эластомерную оболочку от армирующего чулка на длине не более 50 мм. Чулок и резиновую оболочку закрепляют в зажимах машины так, чтобы линия расслоения была обращена к испытателю. Расстояние между зажимами разрывной машины устанавливают 25±5 мм. Усилие, при котором происходит дальнейшее отслоение оболочки от чулка, и является оценкой ее адгезии.

Испытания на стойкость к пропитке и сушке производят на трубках со вставленными в них проволоками. При этом трубки пропитывают и сушат по выбранному режиму, а затем изгибают вокруг стержня диаметром, равным трехкратному внешнему диаметру трубки, и осматривают. В случае отсутствия трещин изогнутые трубки испытывают высоким напряжением в воде. Стойкость трубок к растворителям пропиточных лаков определяют после воздействия холодных и нагретых растворителей. По извлечении из них трубки не позже, чем через 5 мин, должны быть испытаны на продавливание грузом в течение 15 мин. Теплостойкость трубок из пластикатов оценивается путем испытания трубок, нагретых до определенной температуры, на продавливание грузом. Приспособление для испытаний на продавливание и трубки должны быть предварительно прогреты при испытательной температуре. Время нахождения трубок под грузом должно быть не менее 30 мин. В связи с тем, что гибкие выводные провода претерпевают в основном такие же воздействия, как

и гибкие трубки со вставленными в них проводниками, для оценки выводных проводов применяют методы испытаний трубок на боковой удар, стойкость к местному продавливанию и пропитке, на теплостойкость. Эластичность проводов определяют путем навивания их на оправку диаметром, равным трехкратному внешнему диаметру выводного провода. Затем осматривают и испытывают на пробой напряжением в воде после выдерживания в ней в течение 6 ч (для пластиковой и резиновой изоляции). Стойкость выводных проводов к технологическим воздействиям зависит от их жесткости и сопротивления прорезанию и продавливанию. Так как жесткость проводов зависит от гибкости жил и оболочек, то ее определяют на образцах раздельно для проволоки и изоляции (удалив из образца проволоку).

Изоляцию провода закрепляют в зажиме так, чтобы образующая была параллельна циферблату. Зажим приводят во вращение до возможно полного изгибания образца, и угол изгиба определяют по отклонению стрелки. При одинаковой упругости оболочки провод тем жестче, чем жестче его жила. Испытания на динамическое прорезание производят, помещая образец в испытательное приспособление, закрепленное в динамометре таким образом, чтобы образец был перпендикулярен лезвию ножа. Точка приложения лезвия должна быть приблизительно в 50 мм от конца образца. Нож должен иметь лезвие с радиусом 1,6 мм и врезаться в образец со скоростью 5 мм/мин. Силу прорези фиксируют в момент электрического замыкания. После каждого зажимания образец поворачивают на 90° и передвигают на 100 мм. Стойкость к продавливанию определяют, помещая провод между двумя стальными пластинами, сближающимися со скоростью 5 мм/мин. Образец и пластины соединяют с электрической цепью, которая фиксирует замыкание в момент продавливания изоляции, в этот же момент фиксируют значение приложенного усилия. После каждого определения образец поворачивают на 90° и передвигают на 100 мм.

2.1.7. Испытания пропиточных составов

Для повышения механической и электрической прочности, влагостойкости, теплопроводности, нагревостойкости изоляции обмотки электрических машин после укладки подвергаются пропитке специальными составами. Эти составы разделяются на два типа —

лаки, состоящие из пленкообразующей основы и растворителя, и компаунды, т. е. не содержащие растворителей пленкообразующие пропиточные массы.

К числу пленкообразующих компонентов относятся природные и синтетические смолы, битумы, высыхающие масла, эфиры целлюлозы и различные их композиции, которые в процессе сушки после удаления из лака растворителя, а также в результате реакций окисления, полимеризации, поликонденсации или других химических процессов образуют лаковую пленку.

Компаунды вследствие отсутствия растворителей лучше лаков обеспечивают герметизацию узлов и деталей электрических машин и аппаратов.

Пропитка изоляции применяется для улучшения электрических и технологических свойств. Электрическая прочность непропитанной волокнистой изоляции определяется в основном электрической прочностью воздушных прослоек, находящихся между волокнами материалов. Так как электрическая прочность воздуха низка, то при пропитке изоляции она возрастает вследствие заполнения пор материалов пропиточным составом.

Пропитанная изоляция более монолитна, воздушные промежутки с низкой теплопроводностью в ней заполнены пропиточным составом, который обладает более высокой теплопроводностью, вследствие чего снижается нагрев обмотки в эксплуатации, повышается ее срок службы. Снижение перегрева машины позволяет увеличить плотность тока в обмотке, сэкономить обмоточную медь и, соответственно, уменьшить габариты устройства.

Пропитка изоляции также повышает ее влагостойкость, т. к. образовавшаяся при этом на поверхности лаковая пленка замедляет доступ влаги к изоляции. Это важно, поскольку при увлажнении изоляции ее электрическая прочность и тангенс угла диэлектрических потерь резко ухудшаются. Очевидно, что чем более влагостойким будет пропиточный состав, тем большая влагостойкость у пропитанной им изоляции.

Пропитка изоляции обмоток оказывает влияние и на механическую прочность отдельных элементов изоляционных конструкций, а также обеспечивает цементацию витков обмоток, чем предотвращает износ витковой изоляции от вибраций, электродинамических

усилий и последствий тепловых расширений при работе электрических машин. Высокая цементация витков обмоток пропиточным составом особенно важна для обмоток вращающихся частей. Поэтому необходим правильный выбор составов, которые значительно различаются по цементирующей способности.

Еще важнее пропитка стекловолокнистой изоляции, которая в непропитанном состоянии плохо противостоит истиранию и ударам. При пропитке прочность стекловолокнистой изоляции значительно возрастает. Значительно повышается механическая прочность при компаундировании обмоток, изолированных микалентой.

Качество и надежность пропитанной изоляции зависят не только от свойств лакоосновы, но и во многом определяются технологическими свойствами. К этим свойствам относятся содержание пленкообразующих, вязкость, время высыхания в тонком и толстом слоях, время желатинизации, зависимость вязкости и времени сушки от температуры, пропитывающая способность, смачиваемость и др. Пропиточные составы должны обладать весьма высокими диэлектрическими и физико-механическими характеристиками и технологичностью, иметь длительные рабочие температуры не ниже 150 °С, а во многих случаях до 180–200 °С. Кроме того, в современных условиях необходимым требованием является их экологическая безвредность, т. е. нетоксичность и пожаро- и взрывобезопасность.

Для получения необходимых технологических свойств в пропиточную массу добавляют сиккативы — вещества, ускоряющие процессы отверждения лаковой основы, и пластификаторы, придающие гибкость лаковой пленке.

По изменению свойств при нагреве пропиточные составы разделяются на термореактивные, твердеющие в результате сшивания молекул (эпоксидные, кремнийорганические и др.), и термопластичные, твердеющие при охлаждении (битумные, некоторые полиэфирные и полиамидные и др.). Первые после отверждения при высокой температуре (160–180 °С) приобретают стабильные электрические и механические свойства, мало изменяющиеся при нагревании, у вторых при нагреве изменяется вязкость, а следовательно, и свойства. Так, механическая прочность на растяжение (0Р) с 35÷40 МПа при температуре 20 °С снижается до 3,5÷5,0 МПа при 105 °С.

В производстве современных электрических машин основное применение нашли термореактивные пропиточные составы. Наиболее распространенные из них представлены в табл. 16.

Качество и надежность пропитанной изоляции зависят не только от свойств лакоосновы, но и во многом определяются технологическими свойствами пропиточных составов. К этим свойствам относятся содержание пленкообразующих, вязкость, время высыхания в тонком и толстом слоях, время желатинизации, зависимость вязкости и времени сушки от температуры, пропитывающая способность, смачиваемость и др. Знание технологических свойств позволяет установить оптимальный режим сушки и пропитки обмоток электрических машин, выбрать способ и оборудование для проведения этих операций. Особое значение при выборе пропиточного состава имеет совместимость его с другими материалами в системе изоляции.

Способность лака разбавляться определяют путем заливки 20 см^3 отфильтрованного лака в мерный цилиндр (на 100 см^3) и добавления к нему 10 см^3 растворителя. Если при этом наблюдается расслоение лака, то добавляют еще 5 см^3 растворителя и так до тех пор, пока лак не смешается с растворителем или стойко будет показывать склонность к расслоению. Время высыхания лака с растворителем в толстом слое определяют путем заливки лака в коробочки разме-

Таблица 16

Термореактивные пропиточные составы

Тип состава	Марка состава	Лакооснова	ТИ, °С
Лак	МГМ-8	Модифицированный глифталь	130
	МЛ-92	Меламинглифталемасляная	130
	ПЭ-933	Сополимер полиэфирной и эпоксидной смол	155
	ЯЭФ-3	Эпоксиднофенольная	155
	КО-916К	Кремнийорганическая	180
Компаунд	КП-34	Эпоксикремнийорганическая смола К-47 и полиэфиракрил	155
	КП-103	Эпоксиднометакриловая	155
	К-67Ф	Кремнийорганическая	180
	КП-18	Полиэфирная	130
	Б-ИД9127	Ненасыщенные полиэфиримиды	180

ром 45×45×25 мм, изготовленные из алюминиевой фольги размером 95×95 и толщиной 0,2 мм. Количество заливаемого лака зависит от содержания нелетучих и должно обеспечивать после отверждения при определенной температуре и в течение определенного времени (в зависимости от марки лака) толщину слоя лака около 4 мм. После сушки образец извлекают из алюминиевой коробочки, выдерживают 16 ч при температуре 23±2°С, относительной влажности 50±5 % и оценивают его состояние сверху S, внутри I и снизу U.

При оценке состояния отмечают кодами: сверху S гладкая (1) или морщинистая (2) поверхность; снизу U — липкая (2) или нелипкая (1). Для оценки липкости образец помещают на 1 мин на фильтровальную бумагу, на которую накладывают резиновый диск и цилиндрический груз массой 500 г диаметром 20 мм. Состояние I оценивают как однородное или неоднородное, а также по степени жесткости (хрупкотвердая — 1; рогоподобная — 2; жесткая кожеподобная — 3; мягкая резиноподобная — 4; гелеобразная — 5; жидкая — 6). Так же оценивают пузырчатость (отсутствие пузырей — 1, немного пузырей — 2, пузырчатая — 3).

Время желатинизации составов без растворителя определяют путем быстрого помещения пробирки диаметром 16 мм и высотой 150 мм с залитым (100±1 г) составом в нагретую до определенной температуры жидкость. Стабильность лака в закрытом сосуде определяют по изменению массы и вязкости 150 г лака после нагревания его в печи при 60±2°С в течение 96 ч. Каждые 24 ч в лак добавляют растворитель до начального объема.

Пропитывающую способность лака определяют на приборе, состоящем из основания и накладываемой на него части с отверстием, в которое вставлена трубка высотой 110, внутренним диаметром 35 мм. Для проведения испытаний стопку батиста из 50 слоев размером 100×100 мм укладывают на основание прибора и, плотно прижав верхнюю часть прибора к основанию, наливают лак в трубку на высоту 100 мм. Через 15 мин его сливают, извлекают батист и подсчитывают число слоев, в которые проник лак. Для определения пропитывающей способности компаундов применяют аналогичное приспособление, но с высотой столба состава 10 мм. Испытание производят при повышенной температуре, которая зависит от марки компаунда.

Так как в последнее время в большинстве электрических машин применяют эмалированный провод, то больший интерес представляет смачивающая способность лака, которую определяют путем замера высоты капиллярного поднятия лака в зазоре между двумя вертикально расположенными отрезками эмалированных проводов. Высоту подъема лака в зазоре измеряют с помощью специальной установки, снабженной микроскопом и микрометрическим механизмом. Весьма важно, чтобы в первый период сушки после пропитки пропиточный состав не вытекал из обмотки в большом количестве. С этой целью нужно выяснить зависимость вязкости состава от температуры и подобрать такие содержание пленкообразующих и температуру в первый период сушки, при которых вытекание лака было бы минимальным.

Эти параметры определяют на макетах — латунных трубках внутренним диаметром 14 мм, заполненных отрезками круглого провода соответствующей марки и диаметра до коэффициента заполнения 0,65. Степень вытекания определяют по отношению привесов лаков или компаундов после пропитки и сушки трубок, расположенных в горизонтальном и вертикальном положениях (табл. 17).

Таблица 17

Привесы лака в трубках

Марка и диаметр провода	Марка пропиточного лака	Привес лака, 10^3 кг, после пропитки и сушки трубок						Коэффициент вытекания	
		В горизонтальном положении			В вертикальном положении				
		1-й	2-й	двух	1-й	2-й	двух	1 пропитка	2 пропитки
ПЭТ-155, 1,62 мм	КО-964Н	1,40	0,7	2,1	0,28	0,38	0,66	0,20	0,31
	ЭКД-14	3,51	—	—	1,05	—	—	0,29	—
	КО-916к	1,07	0,7	1,77	0,48	0,30	0,73	0,40	0,42
	ПЭ-933	1,10	0,64	1,74	0,46	0,37	0,83	0,42	0,46
	МЛ-92	1,04	0,17	1,21	0,49	0,44	0,93	0,52	0,76
	КП-50	4,3	—	—	1,07	—	—	0,24	—
	ПЭ-91-32	1,75	—	—	0,75	—	—	0,43	—
	Б-ИД-9127	2,57	—	—	0,72	—	—	0,28	—
ПСДК, 1,40 мм	КО-964Н	1,23	1,39	2,62	0,47	0,36	0,83	0,38	0,32
	КО-916к	1,00	1,03	2,03	0,52	0,37	0,89	0,52	0,40

Некоторую информацию о склонности лака к вытеканию можно получить по разнице толщин слоя лака или компаунда в пропитанных испытуемым составом стеклянных лентах, помещенных в вертикальном положении на сушку при разных температурах.

Для выяснения возможности применения лаков для вакуум-нагнетательной пропитки и выбора оптимальной температуры сушки после пропитки лак заливают в такие же коробочки из фольги, как при определении его высыхания в толстом слое, и помещают в термостаты с различной температурой. Периодически лак в коробочках взвешивают и проверяют на желатинизацию. Отмечают время наступления желатинизации и долю удалившихся за это время растворителей (отношение массы улетучившегося растворителя к массе растворителя в лаке должно быть максимальным).

К специфическим методам испытаний термореактивных смол следует отнести определение температуры размягчения на приборе, содержащем нагретую пластинку с регулируемым перепадом температур от одного конца к другому до 250–300 °C. Вдоль нагреваемой пластины размещена температурная шкала. Смола в виде порошка рассыпается узкой полоской по пластине. Через 1 мин порошок стирают, и место, где начинается след расплавленной смолы, считается точкой ее размягчения.

Летучесть смолы при повышенной температуре определяют в приспособлении, показанном на рис. 18. 300 мг смолы подогревают в течение 15 мин при 110 °C, остужают в эксикаторе, кладут на нижнюю платформу приспособления, закрывают верхней и взвешивают с точностью до 1 мг. Затем отделяют верхнюю платформу от нижней, подвешивают приспособление вертикально и нагревают

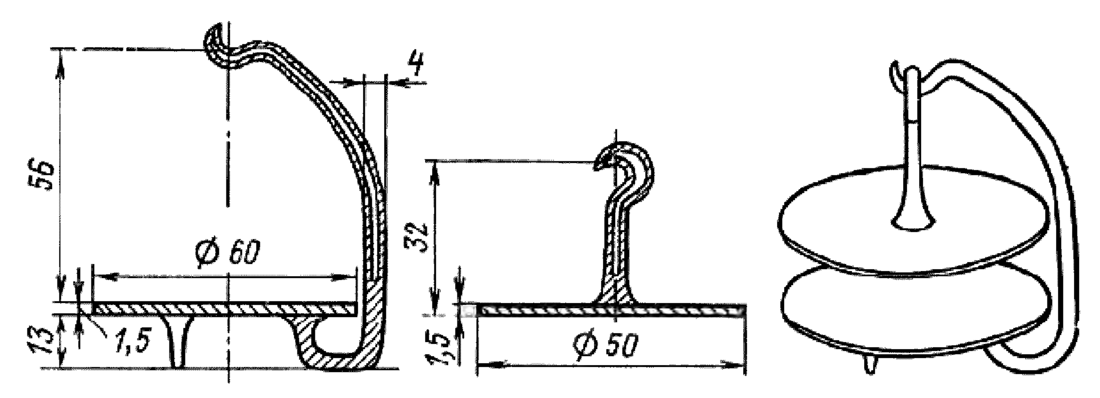


Рис. 18. Приспособление для определения летучести смол без растворителей

в течение определенного времени при определенной температуре в зависимости от марки смолы. Снова соединяют верхнюю и нижнюю платформы, помещают их в эксикатор для охлаждения при комнатной температуре и опять взвешивают. Содержание летучих оценивают как отношение разности масс смолы до и после нагрева к массе до нагрева в процентах.

Сок «жизни» компаунда — это время его нахождения в определенных условиях (в зависимости от марки), в течение которого вязкость или пенетрационная способность его остается в пределах допустимых значений для заливки или пропитки. Время желатинизации (время, необходимое для желатинизации компаунда при определенной температуре) оценивают следующим образом: сосуд со смесью компонентов компаунда (не перемешанных) помещают в ванну, среда которой нагрета до заданной температуры; в смесь опускают стержень, вращающийся таким образом, чтобы не создавалось воздушных пузырей; вращение производится до тех пор, пока двигатель мощностью 10–20 Вт не остановится вследствие желатинизации компаунда. Экзотермический пик компаунда оценивают временем, за которое достигается максимальная температура смеси компонентов компаунда. Испытательный сосуд со смесью опускают в ванну с контролируемой температурой. В смесь помещают регистратор температуры и фиксируют ее максимальное значение и время его достижения. Способность компаунда к запеканию в толстом слое оценивают по твердости запеченного компаунда. Другой способ — определение растворимой части компаунда. Для этой цели высушенный при заданной температуре и в течение заданного времени компаунд укладывают в раздробленном виде в мешочки размером 50×130 мм из стеклоткани, имеющей массу 55–75 г/м^2 (19–24 нити/см). Мешочек предварительно просушивают при 110 °С в течение 1 ч, остужают в эксикаторе и взвешивают. Затем этот мешочек помещают в термостат, где запекают компаунд при заданной температуре в течение заданного времени. Остудив в эксикаторе и взвесив, образец помещают в висячем положении в колбу аппарата.

Метод Сокслета для определения экстрагируемой части состава

В колбу залито 50 г растворителя, полностью растворяющего незапеченный состав. После извлечения из аппарата образцы в висячем положении сушат 2 ч при температуре кипения растворителя, осту-

жают в эксикаторе и взвешивают. Растворимость оценивают в процентах как отношение массы растворенной части состава к массе после сушки перед экстрагированием.

2.2. Методы оценки эксплуатационных свойств электроизоляционных материалов

Эксплуатационные свойства материала — это свойства, которые определяют длительность рабочего ресурса и надежность изделий в соответствии с их функциональным назначением и условиями эксплуатации. Отличительной особенностью эксплуатационных свойств является то, что для их оценки часто используют показатели ресурса или длительности работы материала — часы, циклы, термосмены, либо удельные показатели изменения массы или размеров образца (изделия) — г/ч, $мм^2$/ч, мм/ч и т. п.

В процессе работы электрической машины общего назначения на нее воздействуют повышенные, а иногда пониженные температуры, механические напряжения, влажность (в ряде случаев электрическое поле, что существенно для машин на высокое напряжение). При этом системы изоляции, состоящие из различных электроизоляционных материалов, испытывают специфические воздействия, существенно отличающиеся для различных конструктивных исполнений машин: взаимодействие материалов, особенно пропиточных составов; внутренние напряжения в системах и взаимное перемещение материалов и проводников из-за различных коэффициентов их теплового расширения; повреждения, возникающие при изготовлении; иные условия проникновения влаги, иное распределение электрического поля, чем в однородной изоляции. Поэтому эксплуатационные свойства электрической изоляции должны оцениваться для каждой конкретной ее конструкции, но для первоначальной оценки важно знать свойства каждого входящего в нее материала: электрическую прочность, влагостойкость, нагревостойкость, стойкость при длительном воздействии электрического поля, трекингостойкость и др. Так как методы определения электрической прочности и влагостойкости описаны в ряде источников, то в данном параграфе будут рассмотрены только методы определения нагревостойкости, короностойкости и трекингостойкости.

2.2.1. Оценка нагревостойкости электроизоляционных материалов

При рассмотрении нагревостойкости используются следующие термины и понятия, отраженные в отечественных и международных стандартах.

Нагревостойкость — способность электрической изоляции (ЭИ) выдерживать воздействие повышенной температуры определенного уровня (класса) в течение времени, сравнимого со сроком эксплуатации, без ее недопустимого ухудшения.

Конструкция электрической изоляции (КЭИ) — совокупность обработанных и заранее изготовленных электроизоляционных материалов (ЭИМ) или материал, рассматриваемый в сочетании с присоединенными проводящими частями, предназначенные для использования в конкретных типах или частях изделий. Ресурс ЭИМ — время или другая количественная характеристика длительности воздействия испытательных условий, в результате которого контролируемый параметр ЭИМ достигнет предельного уровня («конечная точка»). Оценка нагревостойкости ЭИМ и систем ЭИ является основной задачей при разработке и внедрении новых материалов и КЭИ. Так как одни и те же материалы могут иметь различное применение (как по конструктивным и технологическим, так и по эксплуатационным условиям), то практически в разных изоляционных конструкциях один и тот же материал может работать при разных предельно допустимых температурах. Например, полиэтилентерефталатная пленка (лавсан), имеющая нагревостойкость 130 °С, в системах изоляции, содержащих слюду или слюдинит и эпоксидно-полиэфирное связующее, может надежно работать при 155 °С.

В связи с вышеизложенным понятие «класс нагревостойкости» материалов заменено МЭК понятиями «температурные индексы» ТИ и «диапазоны температур» ДТ.

Температурный индекс — экстрапалированное значение температуры, при которой материал при определенных условиях испытаний имеет средний срок службы 20 000 ч ($ТИ_{20000}$).

Срок службы — это время, за которое происходит заданное изменение рассматриваемых свойств в абсолютных или относительных единицах. В случае необходимости вводят дополнительную характеристику — диапазон температур, включающую в себя экстаполиро-

ванное значение температур, при которых материал имеет средний срок службы 5000 и 20 000 ч, и значение температуры, соответствующей минимальному значению 98-процентной вероятности для срока службы 5000 ч.

Температурный индекс и диапазон температур определяют по результатам испытаний при трех-четырех температурах, причем каждый материал может иметь несколько температурных индексов и диапазонов температур в зависимости от определяемых свойств и допустимых их изменений при испытании. Поэтому температурные индексы не могут служить базой для классификации системы изоляции. Температурный индекс материала оценивает его способность противостоять постоянному ухудшению определенного свойства при повышенной температуре до такой степени, при которой оно будет влиять на эксплуатационную надежность изоляции в предполагаемых условиях. Нагревостойкость материала определяется по конечному критерию, основанному на его способности выдерживать различные воздействия (например, электрический потенциал, механическое растяжение или изгиб и т. д.), или по изменениям свойств материала. Для определения изменения свойств материалов, вызванных длительным воздействием повышенной температуры, используются испытательные методики. Нагревостойкость изоляционных материалов и их простых сочетаний оценивают с помощью ускоренных испытаний при более высоких температурах, чем температура эксплуатации. Общеизвестно, что результаты испытаний на нагревостойкость очень часто подчиняются закону Аррениуса, т. е. линейной зависимости логарифма времени определенной степени изменения свойств от обратной абсолютной температуры. Этот закон часто используется для определения путем экстраполяции времени такого же изменения свойств, но при более низких температурах.

Испытания на нагревостойкость при нескольких температурах обеспечивают проверку того, что основное предположение о линейной зависимости логарифма времени от обратной абсолютной температуры правильно. Линейность нарушается, если механизм диструкции изменяется в диапазоне испытательных температур. Только если эта проверка дала положительные данные, экстраполяция результатов оправдана. Разные свойства материала, подвергаю-

щегося тепловому старению, изменяются не с одинаковой скоростью, следовательно, диапазоны нагревостойкости и температурные индексы желательно определять для ряда свойств, изменение которых в процессе эксплуатации опасно или на определенном уровне нежелательно. Полученные результаты обеспечивают разработчиков машины информацией о длительных свойствах изоляционных материалов, необходимой для их выбора и дальнейшей оценки при испытаниях изоляционных систем и машины в целом. На старение образцы испытывают не менее чем при трех испытательных температурах либо непрерывно, либо циклично. Метод испытания и конечная точка для определения диструкции изоляционных материалов должны выбираться исходя из самых тяжелых, но реальных условий эксплуатации.

Существуют два способа определения конечной точки: первый — по процентному увеличению или снижению измеряемой величины по сравнению со значением в исходном состоянии, что позволяет сравнивать материалы, но не всегда дает возможность оценивать степень их разрушения; второй — по значению, выбранному в соответствии с требованиями эксплуатации и фиксирующему разрушение материала. Исходное состояние оценивается после 48 ч нормализации материала при температуре на 20 °С большей, чем предполагаемое значение ТИ. Число образцов при испытании должно быть определено для каждой группы материалов и индивидуальной методики испытаний.

Во всех случаях испытания производят в таком диапазоне температур, чтобы низшая отличалась не более чем на 20 °С от предполагаемого температурного индекса, а последующие — на 15–20 °С. Средний срок службы должен быть не менее 5000 ч при низшей температуре и 100 ч при наивысшей. Экстраполяция, необходимая для установления температурного индекса, должна быть в пределах 25 °С.

Испытание образца может быть с разрушением или без него и обычно проводится при комнатной температуре. При испытаниях с разрушением тепловое старение проводят на большой партии образцов, из которых для испытания выбирают группы. Меньшие партии можно использовать, когда проводят испытания без разрушения или контрольные.

При циклических испытаниях при каждой из повышенных температур продолжительность старения на каждом цикле должна быть такой, чтобы выход из строя образцов произошел примерно за одинаковое число циклов, но не менее 8 (табл. 18).

Колебания средней температуры образцов при испытаниях должны быть в пределах ±2 °С (если температуры ниже или равны 180 °С) или ±3 °С (если температуры выше 180 °С). Следует контролировать обмен воздуха, т. к. на термическую деструкцию может влиять подача свежего воздуха. Полная замена воздуха должна происходить приблизительно за час на каждый квадратный метр поверхности образца. При оценке температурных индексов материалов важно правильно выбрать критерий конечной точки, чтобы не впасть в грубую ошибку.

Таблица 18

Предполагаемые температуры и время старения образцов при определении температурных индексов

Температура выдержки, °С	Время старения в цикле, сут, в зависимости от предполагаемого ТИ, °С					
	105	120	130	155	180	>180
300						1
290						2
280						4
270						7
260						14
250					1	28
240					2	49
230					4	
220				1	7	
210				2	14	
200			1	4	28	
190		1	2	7	49	
180	1	2	4	14		
170	2	4	7	28		
160	4	7	14	49		
150	7	14	28			
140	14	28	49			
130	28	49				
120	49					

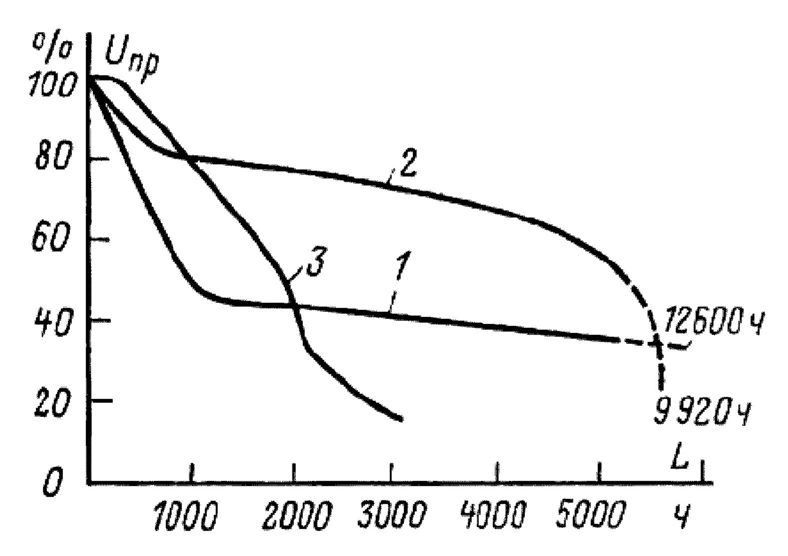


Рис. 19. Изменение пробивного напряжения $U_{пр}$ материалов в течение срока старения L при 170 °С: 1 — гибкий стеклослюдинит ГСП; 2 — пленка ПЭТФ; 3 — пленкосинтокартон ПСК-Ф

Характер изменения пробивного напряжения в процессе теплового старения у различных материалов различен: у материалов на основе слюды и слюдяных бумаг пробивное напряжение сначала резко снижается, затем в течение очень длительного времени остается неизменным, а у пленок и пленкосинтокартонов оно длительное время снижается монотонно и в какой-то момент резко падает. Если пользоваться в качестве критерия конечной точки значением 50-процентного пробивного напряжения (предподчтительное согласно публикации МЭК), то получится, что у менее нагревостойких материалов, например пленки ПЭТФ, температурный индекс выше, чем у материалов на основе слюды (рис. 19). Хорошее совпадение температурных индексов материалов и систем изоляции на их основе получается, когда в качестве критерия конечной точки принимается пробивное напряжение дефектной изоляции (при сквозном проколе), которое ближе к рабочим напряжениям. Для разных типов материалов должна быть установлена частная методика определения температурных индексов.

Определение температурных индексов лакотканей, стеклолакотканей, гибких миканитов и слюдопластов

Для того, чтобы рассмотреть процесс определения температурных индексов, дадим определение данным электроизоляционным материалам.

Лакоткань — электроизоляционный тонкий материал, производимый на базе капрона или шелка, еще в состав добавляется каучук или лак. В зависимости от имеющейся основы диэлектрик может быть разных типов: ЛШМ (специальная ткань ЛШМС) или ЛКМ (специальная ткань ЛКМС).

Стеклолакоткани представляют собой материалы, получаемые из стеклотканей, предварительно пропитанных полиэфирным, масляным или кремнийорганическим связующим. Находят применение как гибкие электроизоляционные материалы в электротехнике в разного рода механизмах и оборудовании, а также в производстве композиционных материалов.

Миканит ГФС, ГФК, ГМС гибкий представляет собой электроизоляционный материал на основе слюд флогопит или мусковит, пропитанной масляно-глифталевым или кремнийорганическим лаком и применяется Миканит гибкий применяется в качестве пазовой изоляции в электрических машинах, подбандажной изоляция якорей, гибких прокладок в индукционных катушках.

Слюдопласты и слюдиниты — прессованные электроизоляционные материалы, состоящие из нескольких слоев слюдинитовой или слюдопластовой бумаги, стеклоткани или стеклосетки, электроизоляционной пленки и связующего. Марка Слюдопласта зависит от материалов, использующихся при их изготовлении, и типа связующего. Основные различия марок заключаются в классе нагревостойкости и диэлектрических характеристиках. Слюда — самый лучший природный диэлектрик, поэтому все современные высокоэффективные ЭИМ содержат слюду.

Процесс определения температурного индекса: не менее 62 медных трубок длиной 600 и диаметром 14–18 мм изолируют полосками материала длиной 590±5 мм и шириной, равной длине окружности трубки плюс 20 мм. На одинаковом расстоянии одного от другого накладывают в виде колец девять электродов из мелкой латунной сетки шириной 20±0,5 мм и закрепляют их по окружности стеклошнуром. Две трубки помещают на 48 ч в печь, нагретую до минимальной температуры старения, после чего определяют пробивное напряжение материала, среднее значение которого принимают за исходное. Не менее чем по 20 трубок ставят в термостаты при трех температурах и после окончания каждого цикла (продол-

жительность цикла согласно табл. 18) определяют пробивное напряжение в девяти точках.

Число циклов при испытании определяется достижением заданных значений пробивного напряжения (критерия конечной точки). Строят кривые изменения пробивного напряжения в зависимости от времени теплового старения при каждой температуре. Затем вычерчивают график зависимости логарифма времени старения до достижения конечной точки от обратного значения абсолютной температуры и экстраполируют прямую линию, построенную по методу наименьших квадратов, для определения ТИ.

Определение температурных индексов гибких материалов и изоляционных лаков путем снижения максимального удлинения

Испытуемый образец представляет собой прямоугольную полоску материала длиной 100 и шириной 20 мм. Полоску вырезают в продольном, поперечном направлении или под углом 45° к направлению волокон нитей основы в зависимости от цели испытания. Для испытаний пропиточных лаков применяют полоски из стеклоткани или стеклоленты толщиной 0,125 мм. Материал полоски должен иметь 23–26 нитей по основе и 16–18 по утку и перед пропиткой прокален. Лак по содержанию пленкообразующих должен быть таким, чтобы при пропитке толщина образца 0,20±0,015 мм получалась за два погружения или более. Образец погружают в лак до тех пор, пока не прекратится образование пузырьков на его поверхности, затем извлекают с постоянной скоростью 100 мм/мин и высушивают в течение 30 мин, после чего повторно погружают в лак, перевернув на 180°, пропитывают и вынимают из него таким же образом, как в первый раз. Далее образцы запекают в том же вертикальном положении, как при последнем погружении в лак. Все образцы формируют, сгибая вокруг оправки диаметром 20 мм. Свободные концы скрепляют вместе скобой. Образцы подвешивают на стержень из нержавеющей стали, используемый в качестве груза для поддержания их в состоянии легкого натяжения и во избежание образования складок на их поверхности. Точность результатов испытания зависит в основном от числа испытуемых образцов. Если наблюдается большой разброс во времени до пробоя среди образцов, подверженных воздействию каждой температуры, то требуется

большее число образцов. Число образцов при каждой испытательной температуре определяют статистическим анализом времени пробоя с той степенью точности, которая желательна при оценке среднего срока службы. Образцы испытывают циклически при трех температурах в течение времени, указанного в табл. 18. После каждого цикла образцы извлекают из печи и изгибают вокруг ступенчатых круглых отполированных стальных оправок, вставленных горизонтально в стойку (рис. 20). Длина каждой ступени 25 мм. Оправки прикрепляют на соответствующей высоте над основанием стойки. Когда испытуемый образец огибают вокруг оправки, на его внешней поверхности материал растягивается. Для того чтобы испытуемый образец плотно прилегал к оправке, используют гибкую петлю из полиэфирной пленки толщиной 0,125 мм. В средней части петли делают по длине два разреза в 5 мм один от другого. Через эти разрезы наматывают алюминиевую фольгу размером 15×40 мм. На концах петли имеется крючок для подвешивания груза.

Образцы, подвергнутые старению, огибают вокруг самой толстой оправки вышеупомянутой гибкой петлей с усилием 0,5 Н. Для об-

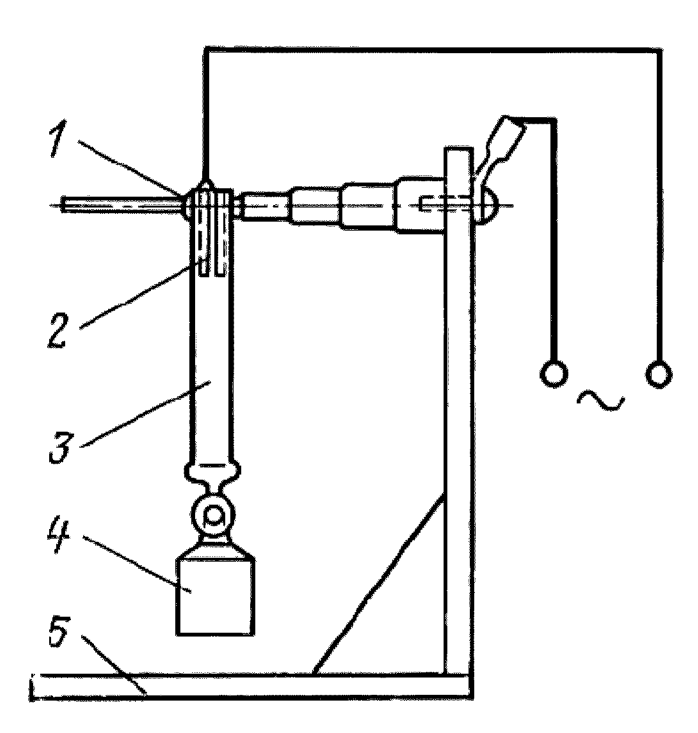


Рис. 20. Приспособление для испытания лаковых пленок на удлинение:
1 — оправка; 2 — электрод из фольги; 3 — огибающая петля; 4 — груз;
5 — основание

наружения трещин между электродом (фольгой) и оправкой прикладывают на 5 с напряжение частотой тока 50 Гц. Напряжение повышают до значения, соответствующего напряженности электрического поля 8 МВ/м. Если пробоя не произошло, образец с огибающей петлей помещают на следующую имеющую меньший диаметр ступень оправки и испытательное напряжение прикладывают снова. Если трещина наблюдается визуально или акустически, но не произошло пробоя, испытание продолжают и фиксируют наименьший диаметр ступени оправки, при котором произошел пробой. Удлинение лакированной полоски рассчитывают, исходя из диаметра ступени оправки, на которой произошел пробой. Приняв в качестве критерия значение максимального удлинения, устанавливают максимально допустимую температуру длительного воздействия.

Определение температурных индексов лаков электрическим методом

Использование: в качестве электроизоляционных лаков для изолирования электрических проводников, обеспечивающих высокую температуру продавливания изоляции (не ниже 320 °С) с температурным индексом не ниже 180. Сущность изобретения: электроизоляционный лак содержит 27–40 мас. ч. олигоэфироизоциануратимида на основе этиленгликоля, трис- (2-гидроксиэтил) изоцианурата, терефталевой кислоты, тримеллитового ангидрида и 4,4'-диаминодифенилметана, взятых в мольном соотношении.

Изобретение относится к электроизоляционным лакам на основе олигоэфироимидов, в частности олигоэфироизоциануратимидов, и может быть использовано при изолировании электрических проводников.

Известен олигоэфироизоциануратимид, используемый в качестве основы лака для нанесения на электрический проводник, полученный из этиленгликоля, трис-(2-гидроксиэтил)-иоцианурата, диметилтерефталата и 4,4'-диаминодифенилметана при соотношении в молях: (1,6–3,3):(0,5–0,8):1:(1,6–2,4):(0,8–1,22). Эмалированный провод на основе данного олигоэфироизоциануратимида обладает высокой нагревостойкостью (удовлетворяет требованиям к эмалированным проводам с ТИ 180), однако не обеспечивает повышенных требований к температуре продавливания изоляции

(не менее 300 °С). Температура продавливания изоляции на основе известного олигоэфироизоциануратимида составляет 265–290 °С.

Наиболее близким по технической сущности к предполагаемому является электроизоляционный состав, содержащий олигоэфироимид, ароматический растворитель и алкиловый эфир ортотитановой кислоты тетрабутоксититан при следующем соотношении компонентов, мас. олигоэфироимид 15,0–35,0; ароматический растворитель 64,4–84,7; алкиловый эфир ортотитановой кислоты (тетрабутоксититан) 0,3–0,6.

Олигоэфироимид в данном составе получают из этиленгликоля, глицерина, диметилтерефталата, тримеллитового ангидрида и 4,4'-диаминодифенилметана при соотношении в молях: (1,50–1,55):(0,40–0,45):1:(0,80–1,10):(0,40–0,55).

В качестве ароматического растворителя используют смесь крезола и сольвента.

Провод, эмалированный этим составом, удовлетворяет требованиям к эмалированным проводам с ТИ 155. При этом его температура продавливания изоляции колеблется в пределах 240–265 °С.

В связи с тем, что одним из компонентов рецептуры известного состава является диметилтерефталат, в процессе синтеза олигоэфироимида выделяется метиловый спирт в количестве 33 % от массы диметилтерефталата, что делает процесс производства данного состава экологически неблагоприятным и пожароопасным.

Кроме того, технология получения олигоэфироимида предполагает проведение процесса в четыре стадии, в связи с чем общая продолжительность технологического процесса его синтеза составляет 56–60 часов. Поставленная задача заключалась в создании лака, обеспечивающего высокую температуру продавливания изоляции эмалированного провода (не ниже 320 °С) с температурным индексом не ниже 180.

Согласно изобретению электроизоляционный лак, содержащий олигоэфироимид, ароматический растворитель и алкиловый эфир ортотитановой кислоты, в качестве олигоэфироимида содержит олигоэфироизоциануратимид на основе этиленгликоля, трис(2-гидроксиэтил) изоцианурата, терефталевой кислоты, тримеллитового ангидрида и 4,4'-диаминодифенилметана, взятых в мольном соотношении — (3,2–4,5):(1,4–2,0):1:(2,0–3,0):(1,0–1,5), с кислотным

числом 1–5 мгКОН/г, количеством гидроксильных групп 8,5–10 % при следующем соотношении компонентов, мас. ч. олигоэфироизоциануратимид 27,0–40,0; ароматический растворитель 59,20–72,46; алкиловый эфир ортотитановой кислоты 0,54–0,80.

В качестве ароматического растворителя лак содержит смесь трикрезола (или дикрезола) и сольвента при массовом соотношении (3–4):1, в качестве алкилового эфира ортотитановой кислоты тетрабуктосититан или полибутилтитанат.

В качестве основы лак содержит олигоэфироизоциануратимид, полученный конденсацией этиленгликоля, трис-(2-гидроксилэтил)-изоцианурата, терефталевой кислоты, тримеллитового ангидрида и 4,4'-диаминодифенилметана, при соотношении в молях: (3,2–4,5):(1,4–2,0):1:(2,0–3,0):(1,0–1,5).

Олигоэфироизоциануратимид получаютсинтезом указанных реагентов в две стадии. На первой стадии проводят реакцию между расчетным количеством этиленгликоля, трис-(2-гидроксиэтил)-изоцианурата и половиной расчетного количества терефталевой кислоты, тримеллитового ангидрида и 4,4'-диаминодифенилметана в среде трикрезола (дикрезола) при 145–190 °С со скоростью подъема температуры 5–7 °С в час м выдерживают при температуре 190 °С в течение 1–1,5 ч до достижения прозрачности реакционной массы и получения расчетного количества выделяющихся побочных продуктов реакции (не менее 95 % от теоретического количества). На второй стадии при 135–140 °С вводят вторую половину расчетного количества терефталевой кислоты и тримеллитового ангидрида, а затем при 140–145 °С вводят вторую половину расчетного количества 4,4'-диаминодифенилметана и проводят конденсацию при 145–215 °С со скоростью подъема температуры 10 °С в час, выдерживают при 210–215 °С до получения олигоэфироизоциануратимида с заданными характеристиками (кислотное число, содержание гидроксильных групп).

При этом по достижении температуры 195–197 °С реакционная масса становится прозрачной, по достижении температуры 200 °С процесс проводят в токе инертного газа.

Основным выделяющимся побочным продуктом реакции является вода, как на первой, так и на второй стадии процесса, которая образуется как за счет реакции, протекающей с участием терефталевой кислоты, так и тримеллитового ангидрида.

Образцы для испытаний изготавливают так же, как и для ранее описанных испытаний, лак наносят на стеклоткань размером 150×300 мм. Образцы закрепляют на рамке и помещают на старение при трех температурах (табл. 18). Испытания проводят циклически и после каждого цикла образцы испытывают напряжением с помощью прямолинейных или криволинейных электродов (рис. 21). Подвижный верхний электрод нагружен массой 1,8 кг. Для плотного прилегания к образцу под нижний электрод рекомендуется подкладывать мягкую резину. Образец испытывается напряжением, которое повышается со скоростью 500 В/с. При каждом испытании должно быть сделано шесть замеров на расстоянии 45 мм и в 40 мм от конца образца. Испытания с помощью криволинейных электродов в какой-то мере отражают условия, в которых находится лаковая пленка в изделии. В качестве критерия конечной точки рекомендуется принимать значение электрической прочности 120 кВ/см. Срок

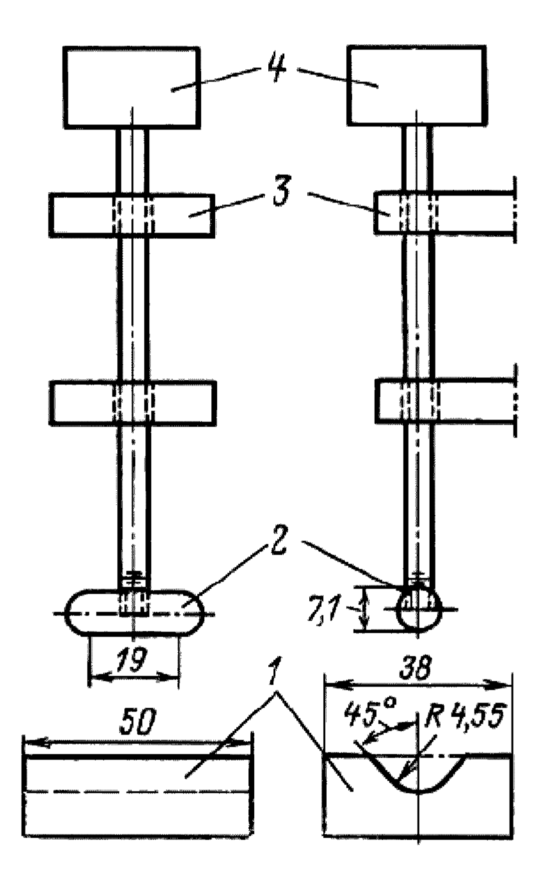


Рис. 21. Приспособление с криволинейными электродами: 1 — нижний электрод; 2 — верхний электрод; 3 — держатель электродов; 4 — груз

службы определяют как число часов старения до достижения средней электрической прочности 120 кВ/см. Толщину образца измеряют до начала старения. Строится график относительной термической стойкости с логарифмической шкалой времени в функции обратного значения абсолютной температуры. Этот метод применяют для пленочных материалов, лакотканей и других гибких материалов.

Определение температурных индексов методом спиральной катушки

Этот метод применяют для оценки температурных индексов пропиточных составов путем определения цементирующей способности тонкой пленки их лаковой основы. Прочность лаковой пленки служит критерием оценки ее качества, т. к. одной из функций пропиточного состава является цементация отдельных компонентов изоляционной системы. По изменениям прочности лаковых пленок в результате отверждения, нагрева и старения при высокой температуре можно сделать сравнительную оценку лаков. Данный метод предусматривает покрытие лаком спиральной катушки из проволоки и отверждение на ней лаковой пленки. Сила, необходимая для разрушения катушки, позволяет определить адгезию и когезию лака. Катушка должна быть изготовлена плотной намоткой неизолированной гладкой и отожженной алюминиевой проволоки диаметром 1 мм на стержень диаметром 6,3 мм. Намотку производят с помощью соответствующего устройства при натяжении провода силой 10 Н, чтобы обеспечить точное положение витков на стержень. Катушки могут быть намотаны большой длины, а затем разрезаны на образцы длиной 75 мм. Концы проволоки каждой катушки сгибают в петлю (рис. 22). Для испытаний лака при высокой температуре рекомендуется алюминиевый провод, т. к. окись алюминия, образующаяся в результате высокотемпературного отверждения или старе-

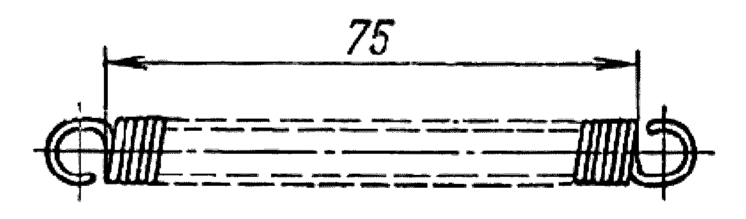


Рис. 22. Спиральная катушка

ния лаковой пленки, прочно соединяется с проводом и не оказывает значительного влияния на результаты испытаний. Испытуемый лак должен быть такой вязкости, чтобы при двукратном покрытии катушки толщина сухой пленки на поверхности провода составляла 0,05±0,005 мм.

Катушку погружают вертикально в испытуемый лак на 5 мин и следят, чтобы на поверхности не образовывались пузырьки воздуха. Затем с помощью механического приспособления вынимают ее из лака со скоростью примерно 100 мм/мин и дают стечь избытку лака в течение 30 мин. После этого катушку помещают в термостат для отверждения лаковой пленки в том же вертикальном положении, что и при погружении в лак. После охлаждения, убедившись в том, что концевые петли не закрыты лаковой пленкой, катушку переворачивают и процедуру погружения в лак и последующего отверждения повторяют. Для испытания на растяжение можно использовать любую универсальную разрывную машину, обеспечивающую постоянную скорость перемещения зажимов 50–150 мм/мин, при условии, что погрешность измерений не превышает 2 % минимальной измеряемой нагрузки. Образец закрепляют в испытательном устройстве машины (рис. 23). Расстояние между двумя

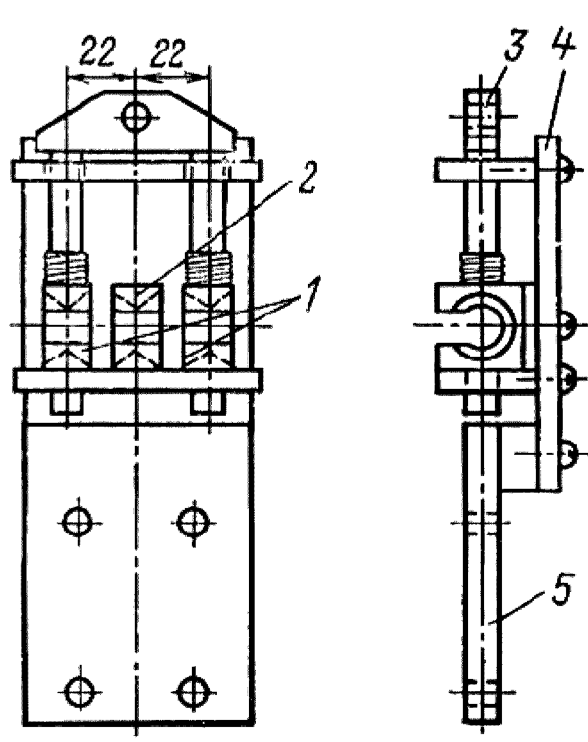


Рис. 23. Устройство для испытания лаков на цементирующую способность:
1 — нижние поддерживающие элементы; 2 — разрушающий элемент; 3 — верхний поддерживающий элемент;
4 — держатель разрушающего элемента; 5 — устройство для соединения с разрывной машиной

поддерживающими элементами устройства должно быть 44 мм; разрушающий элемент должен захватывать испытуемый образец посередине между поддерживающими элементами. Тепловому старению подвергают по пять образцов при трех или более температурах. После старения образцы вынимают из термостата, охлаждают в течение 1 ч и испытывают на цементирующую способность лака. Нагревостойкость определяется зависимостью цементирующей способности, т. е. усилия разрушения, от времени старения при каждой температуре (рис. 24). Срок службы при каждой температуре старения определяют при заданном критерии конечной точки. Затем строят график зависимости логарифма срока службы L от обратной абсолютной температуры T (рис. 25).

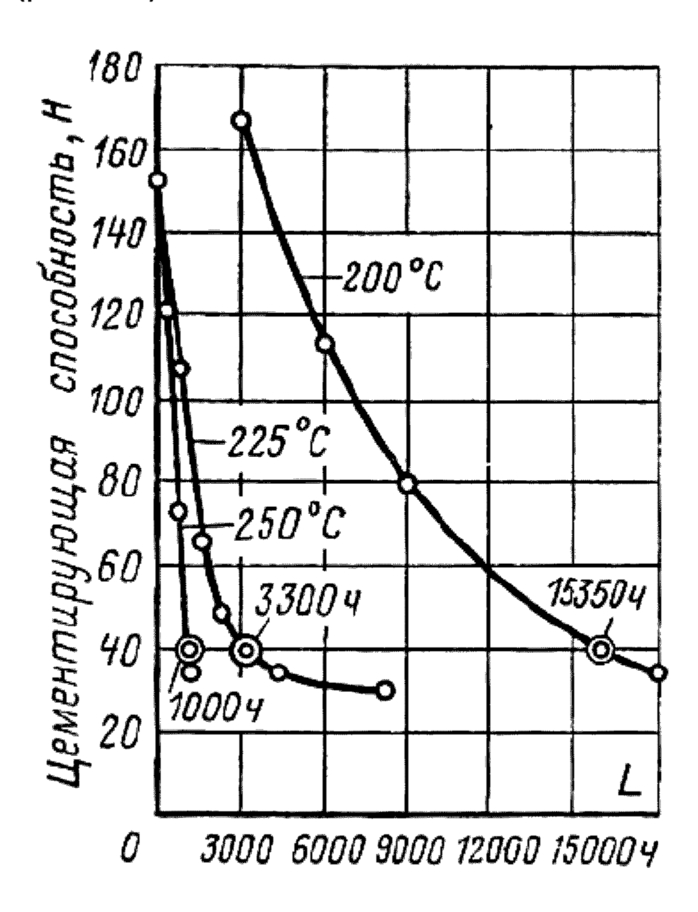


Рис. 24. Изменение цементирующей способности лака в процессе теплового старения

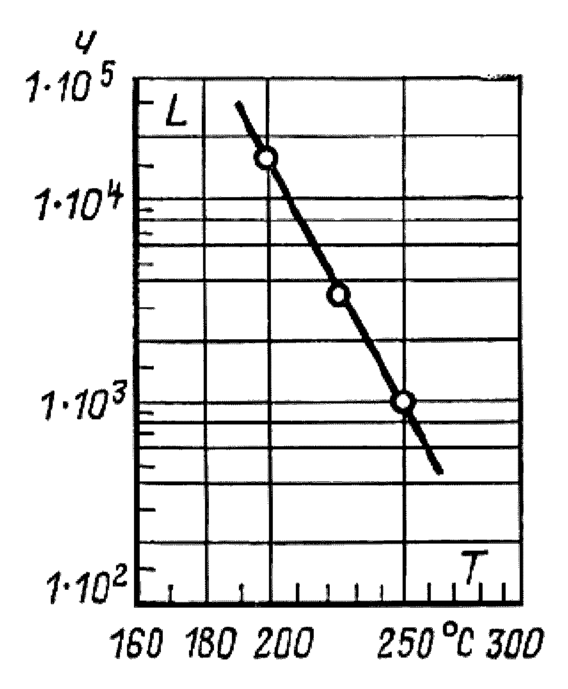


Рис. 25. График нагревостойкости лака

Оценка температурных индексов изоляционных изделий (простые сочетания материалов)

Наиболее отработана методика определения температурных индексов эмалированных проводов. Так как на нее имеется ГОСТ, то описание этой методики не приводится.

Нагревостойкость гибких трубок и выводных проводов оценивают путем старения образцов не менее чем при трех температурах. Для испытаний в трубки вставляют медные или алюминиевые проволоки и изгибают U-образно вокруг оправки диаметром, равным пятикратному диаметру трубки, а провода навивают пятью витками на оправку диаметром, равным пятикратному диаметру провода, снимают с оправки и скрепляют стеклянным шнуром. Для испытания при каждой температуре берут не менее 10 образцов. После каждого цикла старения образцы извлекают из термостатов, остужают в течение 1 ч и помещают в воду для испытания напряжением, которое подают к воде и к проволоке. Критерием конечной точки является испытательное напряжение, превышающее рабочее на 35–40 %. Например, для проводов и трубок, предназначенных для работы при напряжении 660 В, испытательное напряжение обычно принимают 1000 В.

2.2.2. Определение относительной стойкости изоляционных материалов к воздействию поверхностных разрядов

Изоляция может стариться и под действием поверхностных разрядов. Скорость ухудшения свойств изоляционных материалов от действия поверхностных разрядов зависит как от их химического состава и структуры, так и от условий окружающей среды и уровня разрядов. Испытания, проведенные на отдельных материалах, так же как и в случае определения нагревостойкости, не могут быть достаточными для оценки конструкций и систем изоляции с этими же материалами. В процессе работы изоляции может возникнуть эрозия ее поверхности. И эрозия, и химические воздействия могут привести к резкому снижению стойкости изоляции к поверхностному разряду и пробою. Срок службы материалов, подверженных разрядам при данном напряжении, может изменяться в зависимости от толщины образца; поэтому рекомендуется определять относительное сопротивление материалов разрядам путем сравнения среднего срока службы образцов одинаковой толщины, подверженных разрядам в стандартных условиях. Так как испытания на срок службы при нормальных нагрузках эксплуатации при промышленных частотах обычно очень длительны, можно ускорить их путем увеличения частоты испытательного напряжения. Однако при увеличении частоты может возникнуть тепловой пробой от разогрева вследствие возрастания диэлектрических потерь. Проводящие слои при повышенной частоте образуются быстрее, чем при промышленной. Нужно убедиться, что при принятых мерах (например, принудительном охлаждении) длительные испытания при промышленной частоте и сокращенные при повышенной дают идентичные результаты. Испытания проводят с помощью цилиндрических электродов диаметром 6±0,3 мм с радиусом закругления краев 1 мм массой около 30 г. Они должны плотно прилегать к образцу (рис. 26). Испытания выполняют при комнатной температуре (15–35 °С) в воздухе, осушенном до относительной влажности примерно 20 %. Циркуляция воздуха в зоне испытательных электродов должна быть 0,5 л/мин. Изменение срока службы в зависимости от приложенного напряжения должно определяться, по крайней мере при трех напряжениях. Наибольшее испытательное напряжение должно быть выбрано таким, чтобы срок службы образца был равен нескольким часам при

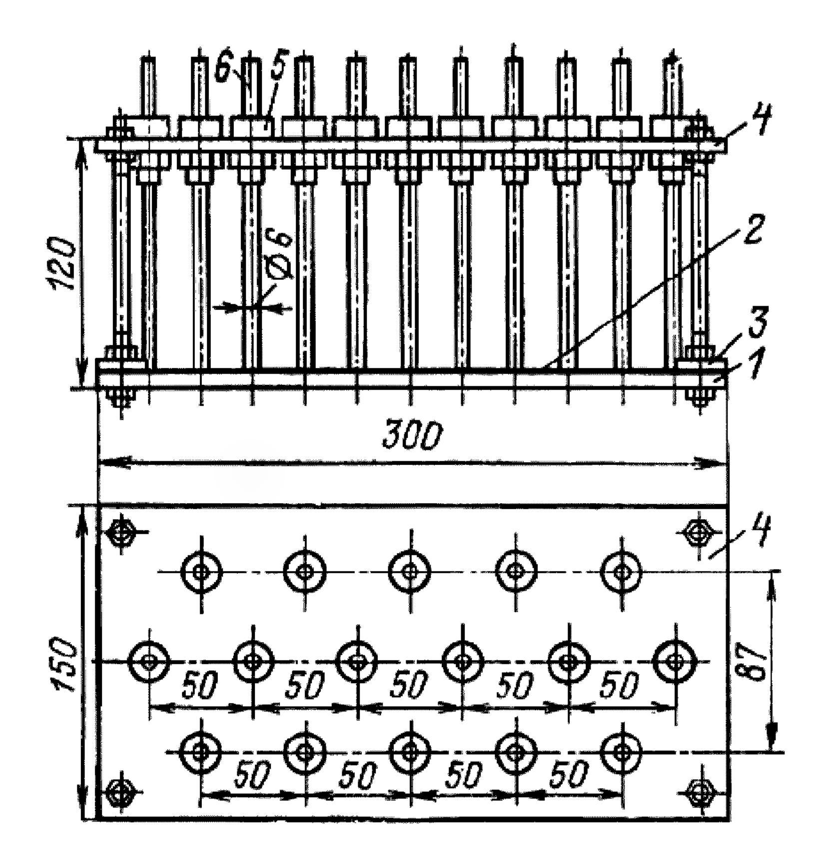


Рис. 26. Устройство для воздействия на изоляционные материалы поверхностными разрядами: 1 — основание; 2 — образец; 3 — зажимы; 4 — стекломиканит; 5 — держатель электродов; 6 — электроды

испытательной частоте тока. Наименьшее испытательное напряжение — такое, чтобы эквивалентный срок жизни образца в пересчете был равен, по крайней мере, 1 году при промышленной частоте тока. Для тонких материалов (менее 100 мкм) допустимо выбирать наименьшее испытательное напряжение, при котором эквивалентный срок службы равен 1000 ч при промышленной частоте. При испытаниях при повышенной частоте срок службы испытуемого материала изменяется обратно пропорционально частоте. Испытательное напряжение должно быть приблизительно синусоидальным, отношение амплитудного значения к действующему должно быть в пределах $\sqrt{2} \pm 5$ %. Испытательное напряжение прикладывают в 50 точках, определяют средние сроки службы при каждом напряжении и строят график зависимости срока службы от напряжения. Так как закономерности зависимости времени выхода из строя об-

разца от напряжения поверхностного разряда не установлены, то экстраполяция графиков недопустима.

Аналогично проводят испытания на стойкость к сквозному пробою. При этом желательно иметь напряженности электрического поля как можно ближе к реально существующим в системах изоляции и форсировать испытания по времени путем повышения частоты тока.

2.2.3. Определение трекингостойкости электроизоляционных материалов

Трекинг — это процесс постепенного образования проводящих угольных дорожек на поверхности внешней изоляции высоковольтных установок вследствие совместного воздействия электрического напряжения, влажности и загрязнений. Устойчивость изоляционных материалов к трекинго-эрозионным разрушениям измеряется классом трекингостойкости материалов.

Эксперименты показывают, что явление трекинга в концевых муфтах наружной установки начинает проявляться уже при напряжении 3 кВ. С дальнейшим увеличением напряжения, без специально принятых мер, ресурс работы кабельных муфт значительно сокращается.

Существует два основных пути для предотвращения явления трекинга в высоковольтных концевых муфтах:

– внесение конструктивных изменений;
– применение материалов, обладающих устойчивостью к трекингу.

Целью изменений в конструкции муфт является увеличение длины путей токов утечки (рис. 27) и, как следствие, снижение вероятности образования на изоляции электрических разрядов, приводящих к образованию проводящих треков и пробоям. Увеличение общей длины разделки концевой муфты, при котором увеличивается расстояние между неизолированными металлическими частями разных потенциалов, является одной из специальных конструктивных мер. Однако этот путь не всегда оказывается удобным и практичным, т. к. с ростом класса напряжения требуется достаточно значительное увеличение длины муфты.

Более эффективным решением, широко применяемым на практике, является установка жильных изоляторов, увеличивающих дли-

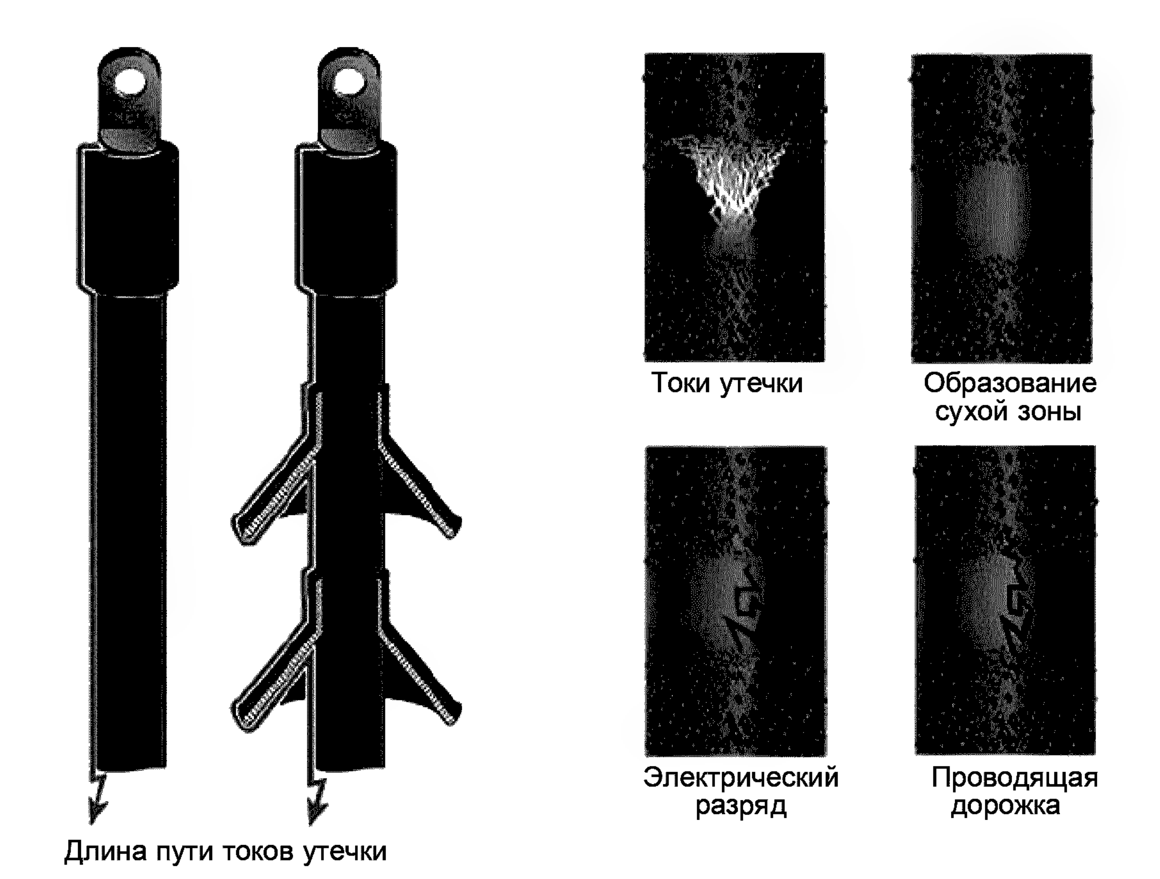


Рис. 27. Увеличение длины пути токов утечки

Рис. 28. Степени промышленного загрязнения

ну пути утечки при сохранении или даже уменьшении габаритов самой муфты. Форма и размеры изоляторов обеспечивают наличие гарантированно сухих зон на поверхности изоляции. Помимо этого, внутренняя сторона «юбок»-изоляторов в гораздо меньшей степени подвержена загрязнениям, что также снижает вероятность возникновения трекинга.

Требованиями ГОСТ 9920-89 к условиям работы изоляции и Правилами устройства электроустановок (ПУЭ) установлены 4 степени промышленного загрязнения атмосферы (рис. 28). Для каждой из степеней загрязнения и различных напряжений сети определены минимально допустимые длины пути токов утечки. Конструкция муфт «КВТ» обеспечивает значительное превышение нормативных значений удельной длины пути утечки.

Однако решающую роль в возникновении или отсутствии трекинга играют сами материалы, применяемые в качестве изоляции

в высоковольтных наружных установках. Не все материалы в одинаковой степени могут противостоять явлению трекинга. Такие материалы, как слюда, фарфор и стекло, обладают высоким классом трекингостойкости и, в определенном смысле, являются эталонами. По этой причине стекло и керамика традиционно использовались для производства высоковольтных изоляторов.

С развитием области полимерных композиционных материалов и современных технологий появилась возможность создавать полимеры, обладающие устойчивостью к трекингу и ультрафиолетовому излучению.

В 2007 г., после проведения серии экспериментов, специалистами завода «КВТ» была разработана специальная рецептура антитрекингового материала на основе сэвилена, отвечающая всем необходимым требованиям трекингостойкости. В лаборатории завода была спроектирована экспериментальная установка и отработана методика для проведения ускоренных испытаний полимерных материалов на трекинго-эрозионную стойкость по ГОСТ 27474-87.

В соответствии с устоявшейся международной традицией термоусаживаемые изделия «КВТ», выполненные из антитрекингового материала, окрашены в кирпично-красный цвет. Из данного материала изготавливаются трубки жильной изоляции, концевые манжеты, перчатки и «юбки»-изоляторы для концевых муфт на напряжение 10, 20, 35 кВ.

Метод оценки трекингостойкости основан на определении относительной стойкости твердых электроизоляционных материалов к трекингу при выдержке их под электрическим напряжением и загрязнении поверхности каплями водно-солевого раствора. Время, в течение которого достигается заданная степень ухудшения свойств, принимается за условный критерий выхода из строя.

Для испытаний берут плоские образцы с гладкой поверхностью размером не менее 15×15 и толщиной не менее 3 мм. Каждый из двух платиновых электродов прижимают с силой 1±0,05 Н к испытуемой поверхности. Электроды имеют прямоугольное сечение 5×2 мм и с одной стороны срезаны под углом 30°С, острая кромка слегка закруглена. Их устанавливают в устройстве (рис. 29), так чтобы угол между ними был 60°С. На электроды подают напряжение промышленной частоты в диапазоне 100–600 В от источника мощностью

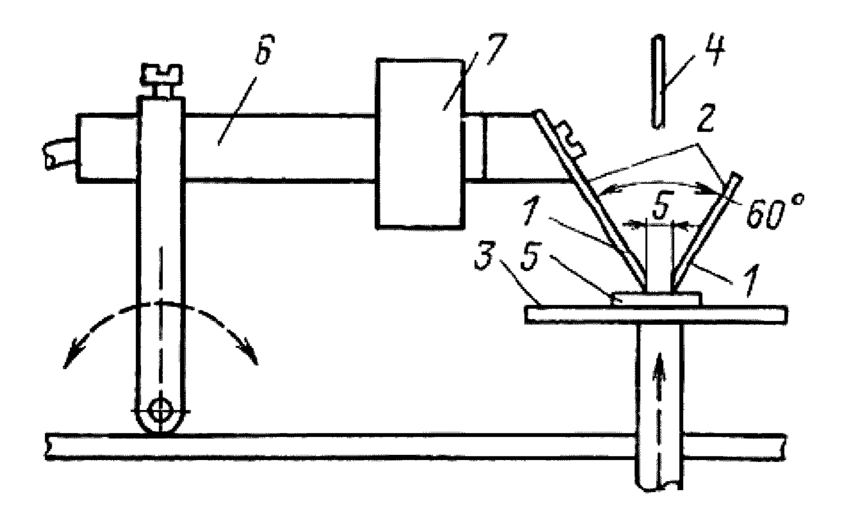


Рис. 29. Устройство для испытания на трекинг:
1 — электроды; 2 — латунные приспособления для регулирования расстояний; 3 — стол; 4 — капельница; 5 — образец; 6 — изоляционная трубка; 7 — груз

не менее 0,5 кВ·А. Изменением сопротивления устанавливают ток при короткозамкнутых электродах 1,0±0,1 А (при этом напряжение не должно снизиться более чем на 10 %). На поверхность между электродами с интервалами 30±1 с капают жидкость. Капли должны падать с высоты 30–40 мм; 1 см^3 жидкости должен содержать 40–50 капель. В качестве жидкости можно взять 0,1±0,0002-процентный раствор хлористого аммония в дистилированной воде, удельное электрическое сопротивление которого должно быть 3,95+0,05 Ом·м при температуре около 23 °С. Раствор капают до тех пор, пока не произойдет прожога поверхности или не упадет 50 капель. При выбранном напряжении определяют число капель до выхода изоляции из строя (прожог). Если оно не будет равно 50, испытания повторяют при более низком или более высоком напряжении до тех пор, пока выход из строя (прожог) не наступит при 50 каплях. Относительный индекс трекингостойкости определяется значением напряжения. Для испытания рекомендуется брать по пять образцов и прикладывать к ним напряжение 175, 250, 300, 375, 500 В.

3. ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ПРОВОДА ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

3.1. Природа электроизоляционных материалов

Изоляция электрических машин первоначально была создана на основе природных материалов — целлюлозы, слюды, асбеста, шеллака, растительных масел, смол, битумов и т. п. С развитием химии высокополимерных соединений и силикатов все большую роль в электромашиностроении начали играть электроизоляционные материалы на основе синтетических смол и стекловолокна, внедрение которых позволило создать более совершенные и экономичные электрические машины для работы в различных, порой очень тяжелых условиях эксплуатации.

Электроизоляционные материалы — класс электротехнических материалов, предназначенных для электрической изоляции, являющейся неотъемлемой частью электрической цепи и необходимой для того, чтобы не пропускать ток по не предусмотренным электрической схемой путям. Они могут быть газообразными, жидкими и твердыми. По химическому составу эти материалы разделяют на органические, представляющие собой соединения углерода с водородом, азотом, кислородом и др. элементами; элементоорганические, в молекулы которых входят атомы кремния, магния, алюминия, железа и других элементов; неорганические — не содержащие в своем составе углерода.

Электроизоляционные материалы предназначены не только для разделения токоведущих частей, но и для создания защиты от опасного воздействия электрического тока.

Нормальная работа электрического прибора или безопасность схемы электроснабжения во многом зависит от используемых ди-

электриков. Некоторые параметры материала, предназначенного для электрической изоляции, определяют его качество и возможности.

Применение изоляционных материалов обусловлено правилами безопасности. Целостность изоляции является залогом безопасной работы с электрическим током. Весьма опасно использовать приборы с поврежденной изоляцией. Даже незначительный электрический ток может оказать воздействие на организм человека.

3.2. Классификация электроизоляционных материалов

В зависимости от мощности тока, проходящего по проводнику, используют разные типы изоляции, которые отличаются своими возможностями.

По каким же параметрам делят электроизоляционные материалы? Классификация диэлектриков основана на их агрегатном состоянии (твердые, жидкие и газообразные) и происхождению (органические: естественные и синтетические, неорганические: природные и искусственные). Наиболее распространен тип твердых диэлектриков, которые можно увидеть на шнурах бытовой техники или любых других электрических приборов.

Твердые и жидкие диэлектрики, в свою очередь, делятся на подгруппы. К твердым диэлектрикам относятся лакоткани, слоистые пластики и различные виды слюды. Воски, масла и сжиженные газы представляют собой жидкие электроизоляционные материалы. Специальные газообразные диэлектрики используются намного реже. К этому типу также относится естественный электрический изолятор — воздух. Его использование обусловлено не только характеристиками воздуха, которые делают его прекрасным диэлектриком, но и его экономичностью. Применение воздуха в качестве изоляции не требует дополнительных материальных затрат.

Твердые диэлектрики

Твердые электроизоляционные материалы принято классифицировать на органические и неорганические. Твердые органические изоляционные материалы чаще всего являются естественными (природными) и искусственными высокополимерными диэлектриками,

имеющими линейную или разветвленную молекулярную структуру, а также кристаллическое, аморфное либо смешанное строение.

Органические диэлектрики

Органические диэлектрические материалы делятся на естественные и синтетические. Естественные органические диэлектрики в настоящее время используются крайне редко, т. к. все больше расширяется производство синтетических, тем самым снижая их стоимость.

К естественным органическим диэлектрикам относят целлюлозу, каучук, парафин и растительные масла (касторовое масло). Большую часть синтетических органических диэлектриков представляют различные пластмассы и эластомеры, часто используемые в электрических бытовых приборах и другой технике.

Неорганические диэлектрики

Неорганические диэлектрические материалы делят на природные и искусственные. Наиболее распространенным из природных материалов является слюда, которая обладает химической и термической стойкостью. Также для электроизоляции используют флогопит и мусковит.

К искусственным неорганическим диэлектрикам относят стекло и материалы на его основе, а также фарфор и керамику. В зависимости от области применения искусственному диэлектрику можно придать особые свойства. Например, для проходных изоляторов используют полевошпатовую керамику, которая имеет высокий тангенс диэлектрических потерь.

Волокнистые электроизоляционные материалы

Волокнистые материалы часто применяются для изоляции в электрических аппаратах и машинах. К ним относят материалы растительного происхождения (каучук, целлюлозу, ткани), синтетический текстиль (нейлон, капрон), а также материалы из полистирола, полиамида и т. д.

Органические волокнистые материалы обладают высокой гигроскопичностью, поэтому редко используются без специальной пропитки.

В последнее время взамен органических материалов применяют синтетические волокнистые изоляции, которые обладают более

высоким уровнем нагревостойкости. К ним относится стеклянное волокно и асбест. Стеклянное волокно пропитывают различными лаками и смолами для повышения его гидрофобных свойств. Асбестовое волокно обладает малой механичной прочностью, поэтому нередко в него добавляют хлопчатобумажное волокно.

Твердые электроизоляционные материалы — наиболее широкий класс диэлектриков, которые применяются в разных областях. Они имеют различные химические свойства, а величина диэлектрической проницаемости колеблется от 1 до 50 000.

Твердые диэлектрики делятся на неполярные, полярные и сегнетоэлектрики. Их главные отличия состоят в механизмах поляризации. Этот класс изоляции обладает такими свойствами, как химическая стойкость, трекингостойкость, дендритостойкость. Химическая стойкость выражается в способности противостоять влиянию различным агрессивным средам (кислота, щелочь и т. д.). Трегингостойкость определяет возможность противостоять воздействию электрической дуги, а дендритостойкость — образованию дендритов.

Твердые диэлектрики применяются в различных сферах энергетики. Например, керамические электроизоляционные материалы наиболее часто используются в качестве линейных и проходных изоляторов на подстанциях. В качестве изоляции электрических приборов используют бумагу, полимеры, стеклотекстолит. Для машин и аппаратов чаще всего применяют лаки, картон, компаунд.

Для применения в различных условиях эксплуатации изоляции придают некоторые особые свойства путем сочетания разных материалов: нагревостойкость, влагостойкость, радиационная стойкость и морозостойкость. Нагревостойкие изоляторы способны выдерживать температуры до 700 °С, к ним относятся стекла и материалы на их основе, органосилиты и некоторые полимеры. Влагостойким и тропикостойким материалом является фторопласт, который негигроскопичен и гидрофобен.

Изоляция, стойкая к радиации, используется в приборах с атомными элементами. К ней относятся неорганические пленки, некоторые виды полимеров, стеклотекстолит и материалы на основе слюды. Морозостойкими считаются изоляции, которые не теряют своих свойств при температуре до –90 °С. Особые требования предъявляются к изоляции, предназначенной для приборов, работающих в космосе или

условиях вакуума. Для этих целей применяются вакуумно-плотные материалы, к которым относится специальная керамика.

Жидкие диэлектрики

Жидкие материалы используют для заполнения внутреннего пространства силовых трансформаторов, реакторов, кабелей, масляных выключателей, конденсаторов и др. Они хорошо пропитывают пористую изоляцию, картоны, бумаги, существенно повышая при этом электрическую прочность изоляции и улучшая теплоотвод. Поэтому к жидким электроизоляционным материалам предъявляются требования не только по изоляционным свойствам. Им должны быть присущи: высокая теплопроводность, стойкость к окислению, совместимость с твердыми материалами, пожаробезопасность, экологическая безопасность, определенная вязкость и т. п.

Жидкие электроизоляционные материалы часто применяются в электрических машинах и аппаратах. В трансформаторе роль изоляции играет масло. К жидким диэлектрикам также относят сжиженные газы, ненасыщенные вазелиновые и парафиновые масла, полиорганосилоксаны, дистиллированная вода (очищенная от солей и примесей).

Основными характеристиками жидких диэлектриков являются диэлектрическая проницаемость, электрическая прочность и электропроводность. Также электрические параметры диэлектриков во многом зависят от степени их очистки. Твердые примеси могут увеличивать электропроводность жидкостей за счет разрастания свободных ионов и электронов. Очистка жидкостей путем дистилляции, ионным обменом и т. д. приводит к возрастанию величины электрической прочности материала, тем самым снижая его электропроводность.

Жидкие диэлектрики разделяют на три группы:

Наиболее часто используются нефтяные масла, такие как трансформаторное, кабельное и конденсаторное. Синтетические жидкости (кремнийорганические и фторорганические соединения) также используются в аппаратостроении. Например, кремнийорганические соединения морозоустойчивы и гигроскопичны, поэтому применяются в качестве изолятора в небольших трансформаторах, но их стоимость выше цены нефтяных масел.

Растительные масла практически не используются в качестве изоляционных материалов в электроизоляционной технике. К ним относятся касторовое, льняное, конопляное и тунговое масло. Эти материалы представляют собой слабополярные диэлектрики и используются в основном для пропитки бумажных конденсаторов и в качестве пленкообразующего вещества в электроизоляционных лаках, красках, эмалях.

С целью преодоления части недостатков нефтяных масел были разработаны и применяются синтетические жидкие диэлектрики.

Хлорированные углеводороды получают из различных углеводородов, замещая атомы водорода атомами хлора. В середине прошлого века наиболее широкое применение получили продукты хлорирования дифенила (соволы, совтолы и т. п.), имеющие хорошие эксплуатационные свойства. Однако токсичность подобных материалов привела к запрещению хлорированных дифенилов практически повсеместно (в Японии и США с 1979 г., в других странах несколько позже).

К жидким диэлектрикам относят также кремнийорганические жидкости (полиметилсилоксановые, полиэтилсилоксановые, полифенилси — локсановые и др.), которые имеют малый tgα, высокое удельное электрическое сопротивление и электрическую прочность. Эти жидкости обладают повышенной нагревостойкосгью (рабочая температура может достигать 350 °С). Но они существенно дороже упоминавшихся выше, более гигроскопичны, имеют низкую смазочную способность и недостаточную дугостойкость.

К дорогим жидкостям относятся и фторорганические жидкости, имеющие ничтожно малую гигроскопичность, высокие нагревостойкосгь и химическую стойкость, малую вязкость, дугостойкость. Но они легколетучи и требуют герметизации, поэтому применение ограничивается устройствами и аппаратами, имеющими герметичный корпус.

Выпускаются и синтетические электроизоляционные жидкости углеводородного состава (как нефтяные масла). Одним из таких отечественных сравнительно дешевых материалов является смесь полимеров изобутилена и его изомеров, называемая октолом. Эти жидкости имеют достаточно хорошие изоляционные свойства, стойкость к тепловому старению и газостойкость. Применяются в основном в высоковольтных конденсаторах.

К важным электроизоляционным жидкостям следует отнести еще один природный диэлектрик — касторовое масло, которое получают из семян клещевины и применяют в основном в импульсных силовых конденсаторах. Касторовое масло практически не окисляется на воздухе и относится к невысыхающим маслам.

Газообразные диэлектрики

Наиболее распространенными газообразными диэлектриками являются воздух, азот, водород и элегаз. Электроизоляционные газы делятся на естественные и искусственные. К естественным относится воздух, которые применяется в качестве изоляции между токоведущими частями линий электропередач и электрических машин. В качестве изолятора воздух имеет недостатки, которые делает невозможным его использование в герметичных устройствах. Из-за наличия высокой концентрации кислорода воздух является окислителем, и в неоднородных полях проявляется низкая электрическая прочность воздуха.

В силовых трансформаторах и высоковольтных кабелях в качестве изоляции используют азот. Водород, кроме электроизоляционного материала, также представляет собой принудительное охлаждение, поэтому часто используется в электрических машинах. В герметизированных установках чаще всего применяют элегаз. Заполнение элегазом делает устройство взрывобезопасным. Применяется в высоковольтных выключателях благодаря своим дугогасящим свойствам.

Оценивая свойства газообразных диэлектриков, следует отметить малую диэлектрическую проницаемость (при расчетах принимается равной 1), высокое удельное сопротивление и особенно очень малое значение tgα. Однако большинство газов при атмосферном давлении имеют невысокую электрическую прочность $E_{пр}$. Для ее повышения увеличивают давление газа. Для воздуха, например, до 2–3 МПа.

Достоинствами газообразных диэлектриков являются восстановление ими электрической прочности после пробоя и отсутствие старения. При одинаковых внешних условиях азот имеет практически одинаковую электрическую прочность $E_{пр}$ с воздухом, поэтому его можно применять вместо воздуха для заполнения газовых конденсаторов и для других целей. К тому же чистый азот не содержит кис-

лорода, оказывающего окисляющее действие на соприкасающиеся с ним материалы. Повышенную электрическую прочность $E_{пр}$ имеют галогенсодержащие газы: гексафторид серы — элегаз, дихлордифторметан — хладон-12 (фреон), перфторированные углеводороды.

Элегаз (сокращение от слов «электричество» и «газ») — шестифтористая сера SF_6 имеет электрическую прочность примерно в 2,9 раза выше, чем воздух. Газ нетоксичен, негорюч, химически инертен, не реагирует с A1, Cu, A и нержавеющей сталью, не разлагается под действием воды, кислот, щелочей, не имеет запаха и цвета. Рабочая температура его 150 °C. Элегаз применяется в смеси с азотом для заполнения устройств с большим объемом (высоковольтные вводы, кабели) или в установках, работающих при низких температурах.

Для электротехники интерес представляет водород, который улучшает охлаждение электрических машин, снижает потери мощности на трение ротора машины о газ и на вентиляцию, замедляет старение изоляции обмоток машины и устраняет опасность пожара при коротком замыкании внутри машины. Однако водородное охлаждение требует герметичности машины, т. к. при его содержании от 4 до 74 % по объему в воздухе образуется взрывчатая смесь — гремучий газ.

Инертные газы (аргон, неон и др.), а также пары ртути и натрия могут использоваться для заполнения газоразрядных приборов. Из-за весьма низкой теплопроводности криптон и ксенон используют при производстве некоторых типов электрических ламп. В качестве низкотемпературного хладоагента в устройствах со сверхпроводящими элементами применяют жидкий гелий, который обладает редкими свойствами: у него самая низкая температура сжижения по сравнению с другими газами (4,216 °K), очень малая плотность, а диэлектрическая проницаемость того же порядка, что и у газов.

В качестве газообразного диэлектрика можно считать и вакуум — безгазовое пространство. Он обладает способностью гасить высоковольтную электрическую дугу, что используется при конструировании выключателей высокого напряжения, в которых имеет место восстановление вакуума после погасания дуги. При этом электрическая прочность вакуумного промежутка зависит от материала применяемых электродов. Вакуум используется в электрических аппаратах типа герконов и т. п.

3.3. Свойства электроизоляционных материалов

Электроизоляционные материалы должны иметь определенные свойства, чтобы выполнять свои функции. Главным отличием диэлектриков от проводников является большая величина удельного объемного сопротивления (10^9-10^{20} Ом·см). Электрическая проводимость проводников в сравнении с диэлектриками в 15 раз больше. Это связано с тем, что изоляторы по своей природе имеют в несколько раз меньше свободных ионов и электронов, которые обеспечивают токопроводимость материала. Но при нагревании материала их становится больше, что способствует увеличению токопроводимости.

Основными свойствами электроизоляционных материалов (диэлектриков), определяющими их техническое применение, являются электропроводность, поляризация и диэлектрические проницаемость и потери, электрический пробой и старение, а также ряд физических, механических и химических характеристик.

Электропроводность диэлектрических материалов обусловлена существованием в них весьма небольшого количества свободных зарядов: электронов (дырок), ионов, молионов (частиц твердых диэлектриков коллоидных размеров 10^6 м, которые заряжаются, адсорбируя имеющиеся в жидкости ионы). В твердых диэлектриках имеются два пути протекания электрического тока: сквозь объем диэлектрика и по его поверхности. Поэтому сопротивление, которым обладает диэлектрик при протекании постоянного тока через его объем называют удельным объемным сопротивлением. Величина, обратная удельному объемному сопротивлению, называется удельной объемной проходимостью.

Удельное поверхностное сопротивление — величина, позволяющая оценить электрическое сопротивление материала при протекании постоянного тока по всей поверхности между электродами. Величина, обратная удельному поверхностному сопротивлению, называется удельной поверхностной проходимостью. Объемное и поверхностное сопротивление определяются экспериментально.

В диэлектриках под действием внешнего электрического поля заряды, входящие в каждую молекулу, смещаются в пределах этой молекулы в противоположных направлениях, в результате чего

в каждом элементе появляется дипольный момент, отличный от нуля. Ограниченное смещение связанных зарядов диэлектрика или ориентацию дипольных молекул под действием электрического поля называют поляризацией (фр. polarization от греч. polos — ось, полюс). Поляризация приводит к появлению дипольного момента у всего объема диэлектрика. Поляризованное состояние диэлектрика в электрическом поле характеризуется электрическим моментом единицы объема и поляризованностью, которая связана с его относительной диэлектрической проницаемостью.

Диэлектрическая проницаемость характеризует способность материала создавать электрическую емкость и представляет собой отношение заряда, полученного при некотором напряжении на конденсаторе, содержащем данный диэлектрик, к заряду, который можно было бы получить в конденсаторе тех же размеров и при том же напряжении, если бы между электродами находился вакуум. Практически величина диэлектрической проницаемости любого диэлектрика всегда больше единицы (величина безразмерная) и зависит от химического состава и строения (2–17 — у жидких и твердых диэлектриков), у газов (вследствие их малой плотности) — близка к единице (1,00058), а в вакууме равна единице. Диэлектрическая проницаемость изменяется также с изменением температуры (с увеличением температуры она понижается) и частоты приложенного к диэлектрику напряжения.

Под воздействием электрического поля происходит нагрев диэлектрика из-за преобразования части энергии в тепловую. Энергия (мощность), рассеиваемая в диэлектриках при воздействии электрического поля и вызывающая их нагрев, называется диэлектрическими потерями. Количественно они характеризуются величиной тангенса угла диэлектрических потерь. У твердых диэлектриков величины диэлектрических потерь находятся в пределах 2–5 $\times 10^{3}$.

Особенно значительные потери мощности могут возникнуть при большом нагреве диэлектрика и вызвать его преждевременное разрушение. Такое разрушение может быть двух видов: пробой толщи материала и разряд по его поверхности. Наибольшее разрушение вызывает пробой или нарушение электрической прочности диэлектрика. При пробое протекание тока происходит по узкому каналу и сопровождается, как правило, необратимыми разрушениями

вещества: образуется сквозное отверстие или проплавляется канал с высокой электрической проводимостью. В зависимости от механизма и причин возникновения различают тепловой пробой, происходящий при существенном тепловом воздействии на материал, и чисто электрический, вызванный увеличением напряжения внешнего поля до критического значения.

Величину критического напряжения однородного электрического поля при пробое, позволяющую оценить способность материала противостоять его разрушению электрическим напряжением, называют электрической прочностью. Определяется пробивным напряжением, отнесенным к толщине диэлектрика в месте пробоя. Численные значения электрической прочности твердых диэлектриков могут достигать миллионов вольт на 1 м толщины. Например, у слюды, кварца и других хороших диэлектриков она составляет порядка 10^8–10^9 В/м.

Механические свойства (разрушающие напряжения при статическом растяжении, сжатии и изгибе; твердость; ударная вязкость; сопротивление раскалыванию; стойкость к надрыву; гибкость; пластичность; мягкость и восстанавливаемость) характеризуют способность диэлектриков выдерживать внешние статические и динамические нагрузки без недопустимого изменения первоначальных размеров и формы. Их количественные и качественные характеристики определяются, как правило, по стандартизированным методикам.

К теплофизическим свойствам диэлектриков относятся теплопроводность; теплоемкость; температуры размягчения, плавления, каплевыделения и вспышки паров; горючесть; нагрево-, тепло-, термо- и морозостойкость, которые характеризуют поведение диэлектрика при нагревании (охлаждении) и в совокупности определяют его допустимую рабочую температуру.

Большинство электроизоляционных материалов, в той или иной мере, обладают способностью впитывать в себя влагу из окружающей среды (гигроскопичны). Не смачиваются водой только вещества, имеющие нейтральное строение молекул (например, парафин, церезин, фторопласт-4 и др.). Вода является сильным дипольным диэлектриком с низким удельным сопротивлением. Поэтому для повышения влагонепроницаемости пористые электроизоляционные

материалы пропитывают маслами, синтетическими жидкостями, компаундами.

Химическая стойкость характеризует способность диэлектриков сопротивляться разрушению (коррозии) при контактировании с водой, кислотами, щелочами, солевыми растворами, топливом, газами и определяется по изменению внешнего вида, массы, электрических и других параметров.

Также различают активные и пассивные свойства диэлектриков. Для изоляционных материалов наиболее важны пассивные свойства. Диэлектрическая проницаемость материала должна быть как можно меньшей. Это позволяет изолятору не вносить в схему паразитные емкости. Для материала, который используется в качестве диэлектрика конденсатора, диэлектрическая проницаемость должна быть, наоборот, как можно большей.

Основными компонентами изоляционных конструкций являются:

1. Для изоляции класса нагревостойкости А — целлюлозные материалы, несущие механическую нагрузку, и пропитывающие и лакирующие их составы в основном на основе природных смол; некоторые синтетические лаки: поливинилацеталевый, поливинилформалевый, полиамидорезольный для эмалированных проводов и др.
2. Для изоляции класса нагревостойкости Е — полиэтилентерефталатные пленки и синтетические лаки, стеклолакоткани латексные и эскапоновые; ассортимент таких материалов ограничен.
3. Для изоляции класса нагревостойкости В — слюда и слюдяные бумаги, несущие электрическую и в ряде случаев механическую нагрузку; целлюлозные, полиэфирные и стеклотканые материалы, выполняющие механические (технологические) функции, и лаки на основе натуральных и синтетических смол.
4. Для изоляции классов нагревостойкости F и Н — слюда и слюдяные бумаги, стекловолокнистые и асбестовые материалы, склеенные и пропитанные составами классов нагревостойкости F и Н; полиэфирциануратные, полиэфиримидные лаки для эмалированных проводов; нагревостойкие бумаги из волокна ароматического полиамида; некоторые синтетические материалы,

например эластомеры (фторорганические и кремнийорганические резины); полиамидные материалы.

5. Для изоляции класса нагревостойкости G — слюда, слюдяные бумаги и синтетические материалы на основе полиимидов, фторопластов, некоторых полиорганосилоксанов и т. п.

В зависимости от сочетаний перечисленных материалов конструкция может иметь более высокую или более низкую нагревостойкость, чем отдельные материалы.

Волокнистые материалы на основе целлюлозы (хлопчатобумажная пряжа, ткани, бумаги) широко применялись в качестве подложек для лакотканей, слюдосодержащих материалов, а также для механической защиты изоляционных конструкций (вспомогательная изоляция) и изготовления слоистых пластиков. Все волокнистые материалы на основе целлюлозы отличаются значительной пористостью и высокой гигроскопичностью, обусловленными большим объемом пор в непропитанных материалах, достигающим 40–50 % общего объема, и полярностью молекул, что определяет низкие электрическую прочность и нагревостойкость волокнистых материалов. Для повышения нагревостойкости, влагостойкости и электрической прочности все целлюлозные материалы обязательно пропитывают. Однако пропитка не предохраняет полностью материал от увлажнения, а лишь уменьшает скорость поглощения влаги, т. к. пропитывающие составы имеют крупные молекулы, не проникающие в субмикроскопические поры, а небольшие молекулы воды легко проникают в них, притягиваясь к полярным группам молекул клетчатки. Поэтому пропитанные целлюлозные картоны, бумаги и хлопчатобумажные ткани (лакоткани, слоистые пластики) можно применять только в машинах с изоляцией класса нагревостойкости А невлагостойкого исполнения и в основном для механической защиты главной изоляции.

Асбестовые материалы обладают высокой нагревостойкостью (до 300°С), но имеют волокнистую структуру и поэтому значительную гигроскопичность.

Пряжа, лента, ткани, бумаги и картоны из асбеста более толсты и жестки, чем из целлюлозы, имеют в 4–5 раз меньшую прочность при разрыве, чем хлопчатобумажные. Асбестовые материалы применяют обычно в тех случаях, когда из-за высокой температуры недо-

пустимо использование целлюлозных материалов. В последние годы асбестовые материалы все больше вытесняются стекловолокнистыми и материалами на основе синтетических волокон. По сравнению с другими волокнистыми материалами стекловолокнистые и синтетические бумаги и ткани имеют меньшую толщину, большую нагревостойкость (стекловолокнистые до 300°С) и меньшую гигроскопичность. Прочность стеклянных лент при разрыве в 5 раз выше, чем хлопчатобумажных, а лавсановых лент еще выше. Поглощение влаги стекловолокнистыми материалами происходит из-за ее абсорбации на поверхности волокон, особенно при наличии замасливателя, применяемого при изготовлении материала. Недостатком стекловолокнистых материалов является пониженная стойкость к изгибам, истиранию, ударам. Пропитка повышает стойкость к этим воздействиям, но не всегда в достаточной степени. Наилучшие результаты дает пропитка эластомерами.

Материалы на основе полиэфирных волокон и пленок (полиэтилентерефталатных — лавсановых) лишены этого недостатка и потому очень технологичны. При пропитке лаками в обмотке такие волокнистые материалы могут успешно работать в машинах с изоляцией класса нагревостойкости F. Еще более нагревостойки материалы на основе волокон ароматического полиамида (до 220°С).

Слюда — важнейший минеральный электроизоляционный материал, она применяется в случае работы изоляционной конструкции при высоких температурах, в атмосфере повышенной влажности, в условиях тропиков, агрессивных сред, при высоких напряженностях электрического поля.

Слюда мусковит используется, когда изоляция несет значительные электрические нагрузки, главным образом в электрических машинах высокого напряжения. Мусковит химически более стоек и механически более прочен, чем флогопит. Слюда флогопит неоднородна по минералогическому составу, темные мягкие флогопиты с жирным блеском имеют пониженную нагревостойкость (иногда 150°С), а светлые твердые могут применяться при температурах 800–900 °С. Темные ненагревостойкие флогопиты имеют пониженные механическую и электрическую прочности. Их применяют для изготовления изоляционных материалов классов нагревостойкости А, Е и В. Для корпусной изоляции обмоток высокого

напряжения использование изоляционных материалов на основе нагревостойкого флогопита недопустимо. Флогопит более гибок, чем мусковит, и поэтому в ряде случаев материалы на основе флогопита оказываются более технологичными (формовочный миканит на флогопите для конусов коллектора, микалента для витковой изоляции и др.).

Мусковит и нагревостойкий флогопит можно применять для изготовления изоляционных материалови изделий, работающих при высоких температурах (класс нагревостойкости G).

В последнее время изоляционные материалы на основе щепанной слюды все больше заменяют слюдяными бумагами — слюдинитом и слюдопластом, которые в сочетании с лаками и подложками образуют такую же обширную гамму изоляционных материалов, как и миканитовые. Материалы на основе слюдинитовых и слюдопластовых бумаг более однородны, чем миканитовые, но в каждом конкретном случае при замене миканитов требуются подбор сочетания материалов в конструкции и отработка технологии.

Основой слюдинитовых материалов являются слюдинитовые бумаги, получаемые из отходов слюды мусковит при равномерном ее нагревании до 700–800°С с последующей химической обработкой. Суспензию слюдяных чешуек на специальной машине разливают в непрерывное полотно и просушивают — получается слюдинитовая бумага. В процессе отлива слюдинитовый слой может быть нанесен на подложки из целлюлозных или стеклянных волокон либо на стеклоткань. Разработанный Гипронеметрудом слюдопласт и изоляционные материалы на его основе имеют более высокие механические свойства, чем слюдинитовая бумага и слюдинитовые материалы (рис. 30). Эти свойства обуславливаются способом получения слюдопласта путем расщепления кристаллов слюды методом упругой волны при многократном прокатывании между валками с последующим расщеплением в дезинтеграторе гидравлическим диспергированием. При этом получают более крупные чешуйкислюды, чем в слюдините (толщиной до 5 мкм и площадью до 7 мм^2). В процессе формирования листа слюдинита или слюдопласта вследствие аномальных свойств воды в тончайших пленках чешуйки слипаются по площади, в результатечего частично восстанавливаются свойства, присущие щепаной слюде. Однако из-за

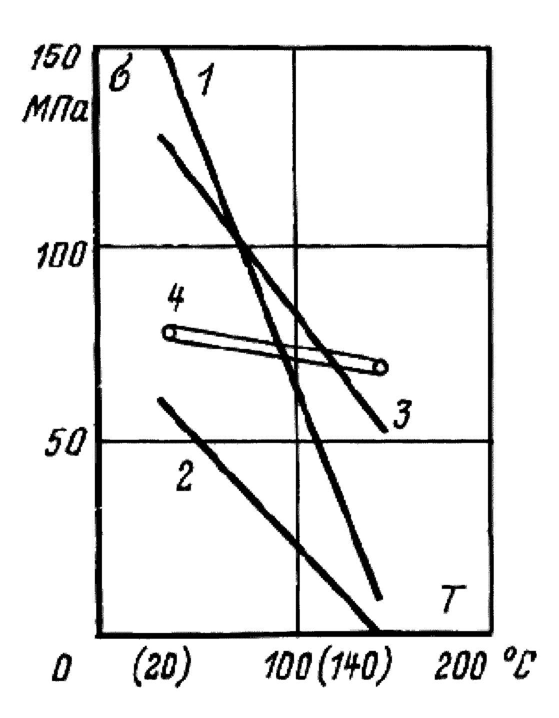


Рис. 30. Сопротивление разрыву σ формовочных материалов:
1 — из слюды; 2 — из слюдинитовой бумаги; 3 — из слюдопластовой бумаги;
1–3 — на шеллаке; 4 — слюдопластовая бумага без связующего

того, что при сушке вода с поверхности малых пластинок слюды интенсивно испаряется, оставляя воздушные включения, электрическая прочность слюдинита и слюдопласта ниже, чем слюды. Например, для слюдопласта 26–35 и для флогопита 115–135 кВ/мм. Слюдопласты, как и слюдиниты, недостаточно влагостойки, поэтому в большинстве случаев их можно применять только после пропитки электроизоляционными лаками. Влагостойкость пропитанных слюдопластовых материалов выше, чем слюдинтовых, но все же ниже, чем миканитовых.

Появление новых типов синтетических материалов, в частности полиэтилентерефталантных, поликароонатных, полиарилатных и полиимидных пленок с высокой электрической и механической прочностью и нагревостойкостью, бумаг из волокон ароматического полиамида, эмалевых лаков для нагревостойких проводов, приводит к все большему вытеснению материалов на основе природного сырья. Однако для изоляции обмоток высокого напряжения слюда и слюдяные бумаги являются пока единственно приемлемыми материалами.

3.4. Обмоточные провода

Обмоточные провода — предназначены для изготовления обмоток электрических машин, аппаратов и различных приборов. По материалам, применяемым для изготовления токопроводящих жил, они делятся на: медные, алюминиевые и из сплавов сопротивления.

По видам изоляцию обмоточных проводов можно классифицировать следующим образом: эмалевая, волокнистая, эмалево-волокнистая, бумажная, пластмассовая, пленочная, стекловолокнистая, стеклоэмалевая, сплошная стеклянная.

Достоинства обмоточных проводов с эмалевой изоляцией:

1. Обладают малыми толщинами изоляции.
2. Хорошими физико-механическими и электроизоляционными характеристиками.
3. Нагревостойкостью.

Маркировка с изоляцией на основе масляных и высокопрочных синтетических лаков: ТИ-105, 120, 130, 155, 180 и выше.

Медные эмалированные провода с изоляцией на основе масляных лаков (марка ПЭЛ) выпускаются в диапазоне диаметров 0,02–2,5 мм. Эти провода имеют достаточно высокие электроизоляционные характеристики, которые сохраняются даже в условиях воздействия повышенных температур и влажности. Провода марки ПЭЛ применяются для изготовления катушек электрических аппаратов, рамок приборов и т. п.

Провода с изоляцией на поливинилацеталевой основе отличаются механическими характеристиками, хорошими электроизоляционными свойствами, стойкостью к действию сред агрессивных, что позволяет с успехом использовать их для изготовления обмоток электрических машин и аппаратов без дополнительных покрытий.

Эмалированные провода с ТИ-120 выпускаются из марок ПЭВТЛ-1,ПЭВТЛ-2 диаметром 0,05–1,6 мм с изоляцией на основе полиуретанового лака. Особенностью этих проводов является возможность обслуживания их без предварительной зачистки эмали, что значительно облегчает пайку.

Применяются в приборостроении и радиотехнической промышленности.

Круглые провода выпускаются в диапазоне диаметров 0,50–2,5 мм, а прямоугольные — в диапазоне сечений от 1,6 до 11,2 мм. Помимо высокой нагревостойкости эти провода отличаются повышенными механическими характеристиками, стойкостью к токовым перегрузкам и хладонам, имеют достаточно хорошие электрические свойства. Эти провода используются в тех случаях, когда необходимо обеспечить надежную работу электрооборудования с ТИ-180 и выше, особенно при тяжелых условиях изготовления обмоток.

Обмоточные провода с полиимидной изоляцией имеют самую высокую нагревостойкость среди эмалированных проводов, достаточно хорошие электрические характеристики, которые практически не изменяются при их нагревании до температуры 230.

Провода с волокнистой изоляцией на основе хлопчатобумажной пряжи, натурального шелка, а также синтетических волокон изготовляются, как правило, методом двухслойной обмотки токопроводящих жил.

Для волокнистой изоляции, которая имеет ТИ-105, характерны большая толщина изоляции и гигроскопичность, невысокая электрическая прочность, что ограничивает их использование без дополнительных покрытий, которыми, как правило, являются эмаль-лаки на масляной поливинилаусталевой, полиэфирной и других основах.

Обмоточные провода с волокнистой и эмалево-волокнистой изоляций используются, как правило, для намотки электрических машин, аппаратов и приборов в тех случаях, когда при изготовлении обмоток провод испытывает повышенные механические нагрузки и нет жестких ограничений по толщине изоляции.

Обмоточные провода с бумажной изоляцией относятся к ТИ-105 и выпускаются главным образом для изготовления обмоток масляных трансформаторов.

Обмоточные провода с пластмассовой изоляцией относятся к ТИ-105 и применяются в основном для изготовления обмоток наружных электродвигателей, которые работают в среде перекачиваемой жидкости при повышенных температурах и давлениях.

Обмоточные провода с пленочной изоляцией так же очень широко применяются для наружных проводов с пленочной изоляцией применяется для обмоток высоковольтных электрических машин.

К их числу относятся прямоугольный провод марки ППЛБО, изоляция которого состоит из трех слоев лавсановой пленки и одного слоя хлопчатобумажной пряжи.

Обмоточные провода со стекловолокнистой изоляцией получили очень широкое распространение ввиду высокой надежности, повышенной нагревостойкости, стойкости к токовым перегрузкам. Они применяются в основном для обмоток электродвигателей для кранов: морских судов и сухих трансформаторов. Выпускаются они с медными и алюминиевыми жилами как круглого, так и прямоугольного сечения.

Стеклоэмалевая изоляция обмоточных проводов в своей основе содержит систему Si°-Pb°-B°, что позволяет данными проводами длительно работать при высоких температурах.

Для длительной эксплуатации при 400°С выпускаются обмоточные провода со стеклоэмалевой изоляцией марки ПЭЖБ. Для работы (500°С) выпускают провод с жилой из биметаллической проволоки серебро-никель, марка ПЭЖБ-700.

Обмоточные провода со сплошной стеклянной изоляцией получаются методом вытягивания тонкой металлической нити из разогретого токами высокой частоты прутка металла, находящегося в стеклянной трубке, и относится к классу микропроводов. Провода с манганиновой жилой имеют марку ПССМ и используются в основном для приготовления резисторов (диаметр 3–100 мкм). Медные провода марки ПМС имеют диаметр 5–200 мкм, а толщина изоляции составляет 1–35 мкм.

Провода с изоляцией из хлопчатобумажной, капроновой или шелковой (натуральный шелк) пряжи в пропитанном сочетании относятся к классу нагревостойкости А; с изоляцией из лавсановой пряжи, пропитанные после намотки лаком с нагревостойкостью класса В, — к классу нагревостойкости Е; со стекловолокнистой и дельта-асбестовой изоляцией, проклеенной алкидными или фенолоалкидными лаками (6КМ, ФМ-97), — к классу нагревостойкости В, при проклейке кремнийорганическими лаками — к классу Н.

Провода с хлопчатобумажной, шелковой, дельта-асбестовой и капроновой изоляцией невлагостойки и не должны применяться в изделиях, работающих в условиях повышенной влажности, тропического климата и химически агрессивных сред; провода с лавса-

новой обмоткой обладают большей влагостойкостью и стойкостью к воздействию тропического климата и химически агрессивных сред. К проводам с органической волокнистой изоляцией относятся провода с двойной хлопчатобумажной обмоткой марки ПБД или с одной хлопчатобумажной и второй лавсановой обмотками марки ПЛБД.

Провода с эмаль-волокнистой изоляцией ПЭЛБО, ПЭЛШО, ПЭЛКШО, ПЭЛО, ПЭПЛО, ПЭТЛО изолированы слоем эмали и обмоткой из хлопчатобумажной, шелковой, капроновой или лавсановой пряжи. Провода с обмоткой из лавсановой пряжи в настоящее время применяют ограниченно (диаметр провода до 1 мм), т. к. при намотке провода с большими натяжениями лавсановая пряжа распушается и раскручивается. При разработке проводов с пропитанной лавсановой обмоткой область их использования расширится.

Провода со стекловолокнистой пряжей, проклеенной органическими лаками, выпускают марки ПСД с изоляцией нормальной толщины (0,23–0,33 мм) и марки ПСДТ с тонкой изоляцией (толщиной 0,18–0,23 мм). Последние имеют более низкую электрическую прочность. Толщина изоляции проводов с дельта-асбестовой изоляцией ПДА такая же, как и провода ПСД, но их пробивное напряжение на 20–30 % ниже. Провода со стекловолокнистой пряжей, проклеенной кремнийорганическим лаком КО-916к, марок ПСДК и ПСДКТ имеют такую же толщину изоляции, как и провода ПСД и ПСДТ соответственно, но более высокие влаго- и нагревостойкость (рис. 31).

Механическая прочность изоляции (особенно стойкость к истиранию) у проводов ПСДК и ПСДКТ вдвое ниже, чем у проводов ПСД, ПСДТ, однако в процессе старения она существенно повышается (рис. 32, 33). Нагревостойкость их достаточно высокая (табл. 19). Механическая прочность проводов с дельта-асбестовой обмоткой, пропитанной глифталевым лаком, такая же, как у проводов со стекловолокнистой обмоткой, пропитанной кремнийорганическим лаком. Для улучшения технических характеристик поверхность проводов со стекловолокнистой изоляцией лакируют, соответственно марки проводов дополняются индексом Л (ПСД-Л, ПСДТ-Л, ПСДКТ-Л, ПСДК-Л). Выпускавшиеся ранее провода с эмаль-волокнистой изоляцией (ПЭТСО, ПЭТСОТ

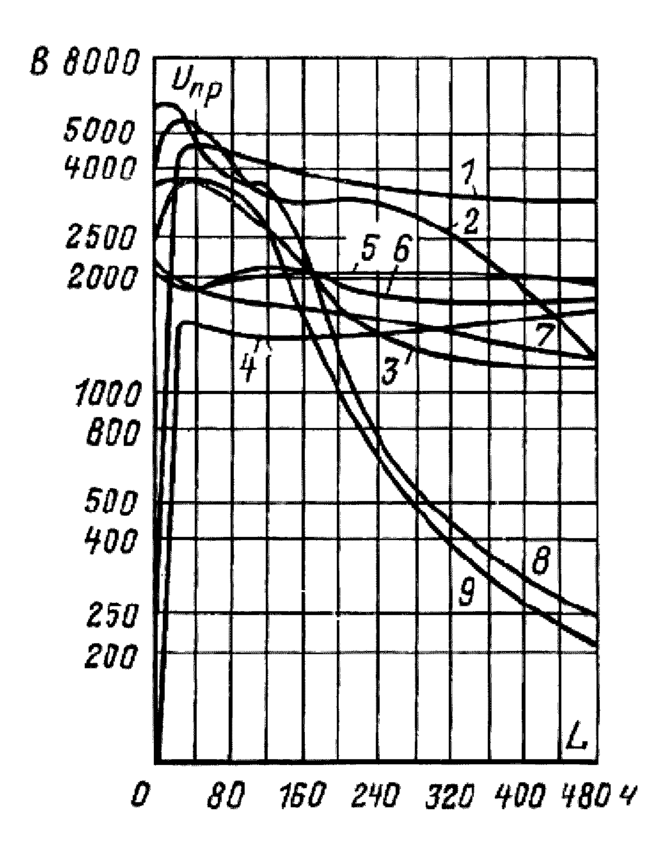


Рис. 31. Зависимость пробивного напряжения $U_{пр}$ изоляции обмоточных проводов от времени старения L: 1 — ПЭТСО; 2 — ПЭЛБО, пропитанный лаком БТ-987; 3 — ПЭЛБО непропитанный ; 4 — ПБД, пропитанный лаком БТ-987; 5 — ПСДК; 6 — ПСД; 7 — ПЭТКСО; 8 — ПЭВ-2; 9 — ПЭМ-2

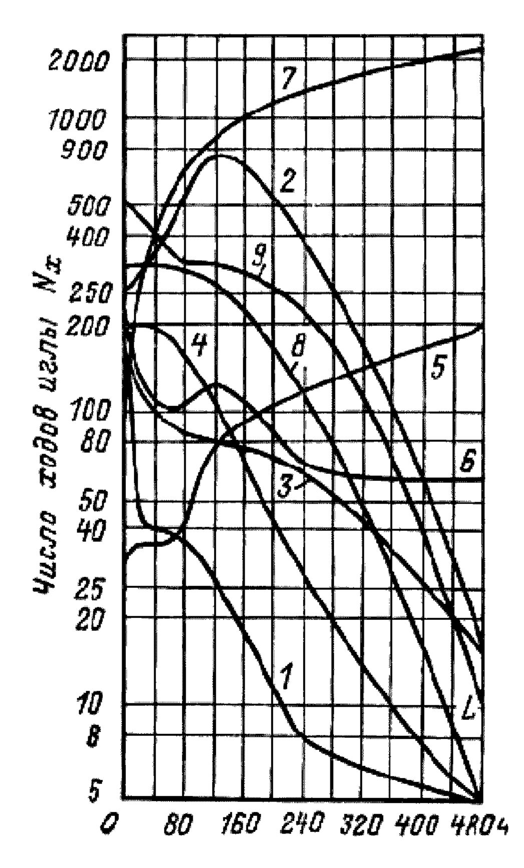


Рис. 32. Зависимость стойкости проводов к истиранию от времени старения L: 1 — ПБД непропитанный ; 2 — ПЭЛБО, пропитанный лаком БТ-987; 3 — ПЭЛБО непропитанный ; 4 — ПБД, пропитанный лаком БТ-987; 5 — ПСДК; 6 — ПСД; 7 — ПЭТКСО; 8 — ПЭВ-2; 9 — ПЭМ-2

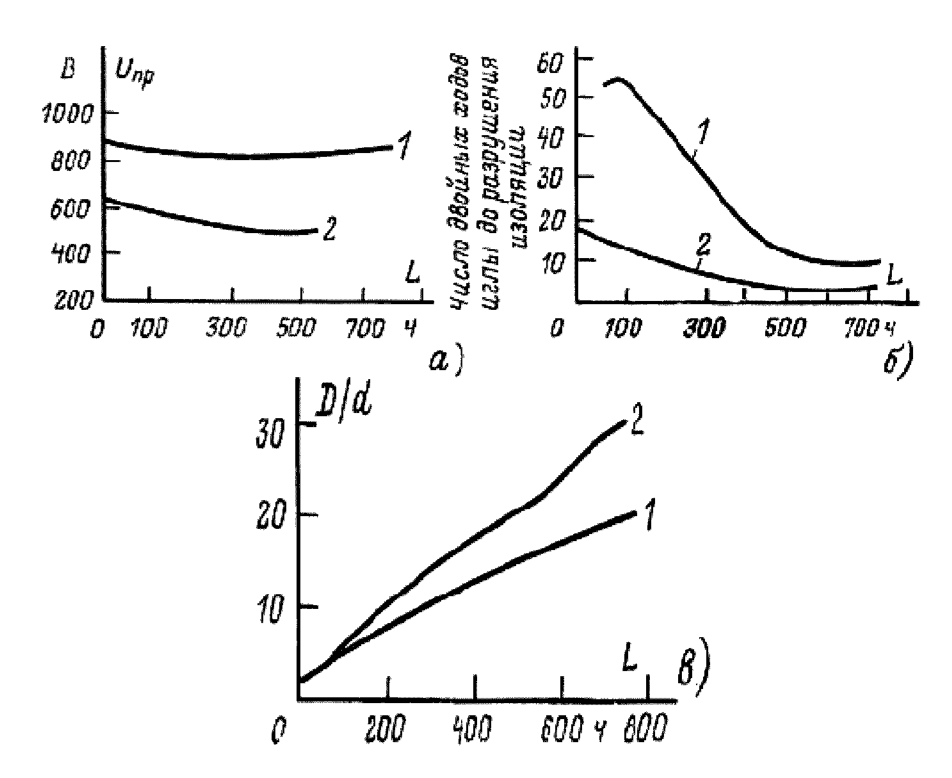


Рис. 33. Изменение свойств проводов диаметром 1,35 мм в процессе теплового старения при 300 °С: а — пробивное напряжение; б — прочность на истирание; в — эластичность; 1 — ПСДК; 2 — ПСДКТ

Таблица 19

Срок службы проводов со стекловолокнистой изоляцией

Провода	Пропиточный лак и пропиточная эмаль	Средний срок службы образцов, ч, при температуре, °С					ТИ $_{20000}$ °С
		150	170	190	210	250	
ПСДКТ	МГМ-8	—	—	4718	634	185	172
ПСДТ	МГМ-8+ГФ-92ГС	—	8265	5384	1129	—	154
ПСДТ	КО-916к	—	11487	10187	5189	—	172
ПСД (1-я партия)	МГМ-8+ГФ-92ГС	23982	12739	1472	—	—	156
ПСД (2-я партия)	МГМ-8+ГФ-92ГС	—	3024	1472	535	—	133
ПСД (2-я партия)	ПЭ-933+ПЭ-91	—	11249	6415	2630	—	156
ПСД (3-я партия)	МГМ-8+ГФ-92ГС	—	5465	2264	1004	—	143
ПСД (3-я партия)	КО-916к	—	15021	12094	8005	—	156

и ПЭТКСО) как имеющие меньшую нагревостойкость и механическую прочность сняты с производства и заменены проводами ПСДТ и ПСДКТ.

Так как стекловолокнистая обмотка часто недостаточно хорошо пропитана и проклеена и пылит при намотке катушек, то в последнее время разработаны провода марок ПСЛД и ПСЛДК, изолированные комплексными стеклополиэфирными нитями. В них волокна прочно связываются с проволокой и между собой при изготовлении в процессе термообработки. Провода ПСЛД дополнительно не пропитываются лаком, а ПСЛДК пропитываются лаком КО-916. У этих проводов механическая прочность изоляции — стойкость к истиранию — в несколько раз выше, чем у проводов ПСД и ПСДК.

Эластичность изоляции проводов ПДА в 2–3 раза меньше, чем проводов ПСД. Применение проводов с высокопрочной эмалевой изоляцией более эффективно потому, что они имеют толщину изоляционного слоя, в 1,5 раза меньшую, чем провода ПЭЛШО, и в 2–3 раза меньшую, чем провода ПБД и ПСД. Скользкая гладкая поверхность эмалированных проводов облегчает укладку обмотки и позволяет повысить коэффициент заполнения паза проводами приблизительно на 5–7 %. Эмалевая изоляция также более теплопроводна, чем эмаль-волокнистая и особенно волокнистая, и обладает высокой влагостойкостью (рис. 34). В настоящее время выпускаются медные эмалированные провода следующих марок: ПЭВ-2, ПЭМ-2, ПЭВТЛ, ПЭТВ, ПЭТимид, ПНЭТимид, ПЭТ-200, ПЭТ-155, ПЭФ-155, ПЭТМ, ПЭТВМ, ПЭЛР-2 и в малых количествах аналогичные алюминиевые — ПЭВА, ПЭТВА и др. Имевшие наиболее широкое применение провода с поливинилацеталевой изоляцией винифлексовой ПЭВ-2, ПЭВА, металвиновой ПЭМ-2 вытесняются более нагревостойкими проводами с изоляцией полиэтилентерефталатной (ПЭТВ), полиэфиримидной (ПЭТ-155), полиэфиримидциануратной (ПЭФ-155). Провода с поливинилацеталевой изоляцией относятся к классу нагревостойкости А. По комплексу свойств (стойкости к тепловым ударам, перегрузкам по току, механической прочности, стойкости к истиранию) они превосходят провода многих других марок. Провода влагостойки и могут применяться для машин усиленно влагостойкого и тропического исполнений, но их нельзя использовать в машинах, работающих в агрессивных средах. Провода

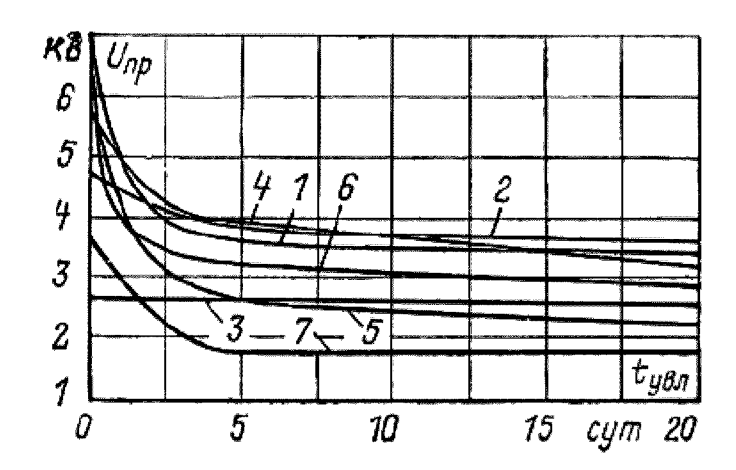


Рис. 34. Зависимость пробивного напряжения Uпр витковой изоляции от времени пребывания в условиях 98-процентный относительной влажности воздуха tувл при 20–23 °С: 1 — ПЭТВ, пропитанный лаком 321т; 2 — ПЭТВ, пропитанный лаком ЭФ-ЗБСУ; 3 — ПСДК, пропитанный лаком ЭФ-ЗБСУ; 4 — ПЭВ-2, пропитанный лаком 321т; 5 — ПЭЛР-2, пропитанный лаком 321т; 6 — ПЭЛБО, пропитанный лаком 321т; 7 — ПЭТВ непропитанный

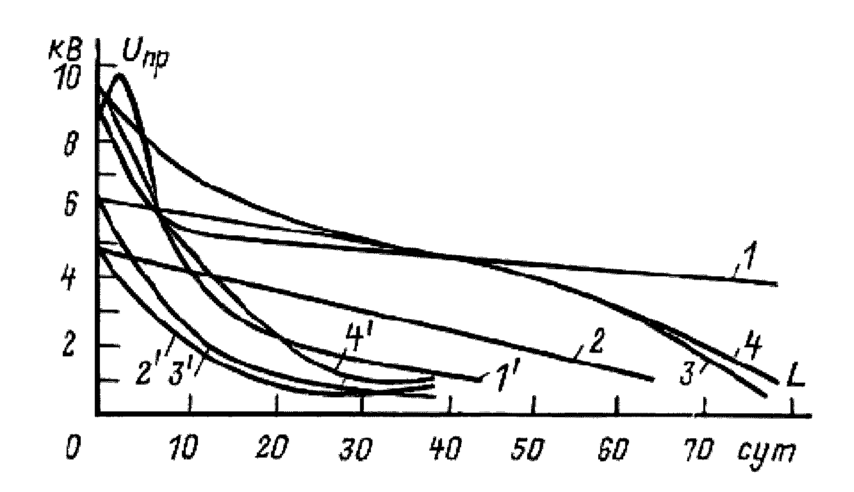


Рис. 35. Зависимость пробивного напряжения $U_{пр}$ эмалировавнных проводов от времени старения L: 1, 1′ — провод ПЭВТЛ диаметром 1,62 мм; 2, 2′ — ПЭВ-2 диаметром 1,25 мм; 3, 3′ — ПЭВ-2 диаметром 1,62 мм; 4, 4′ — ПЭМ-2 диаметром 1,62 мм; 1, 2, 3, 4 — старение при 150 °С; 1′, 2′, 3′, 4′ — старение при 170 °С

ПЭМ-2 равноценны по своим свойствам (рис. 35, табл. 20) проводам ПЭВ-2, но более стойки к растворителям пропиточных лаков. Эмалевая изоляция проводов ПЭВ-2 разбухает в растворителях и в воде. Провода ПЭС-2, эмалированные лаком 2756 (Италия), равноценны

Таблица 20

Нагревостойкость эмалированных проводов с поливинилацеталевой изоляцией

Марка, диаметр провода, мм, тип пропиточного лака, эмали	Средний срок службы образцов, ч, при температуре, °С			$ТИ_{20000}$ °С
	125	150	170	
ПЭВ-2, 1,81 без пропитки	6009	1527	388	108
То же, лак МЛ-92	4854	1664	429	101
То же, лак МЛ-92+ГФ-92ГС	4114	1210	596	94
То же, лак МЛ-92+ ГФ-92ХС	3438	1030	478	92
ПЭВ-2, 2,1 без пропитки	6126	521	89	113
То же, состав MER-200+МТГФА	3868	503	209	103
То же, капсулирование с помощью состава MER-200+МТГФА	5161	703	227	107
ПЭС-2, 1,62 без пропитки	4852	474	137	109
То же, лак МЛ-92	8533	2339	1883	102
ПЭМ-2, 1,25 без пропитки	5864	1010	525	104

по основным своим свойствам проводам ПЭВ-2, но их нагревостойкость в большей степени, чем у ПЭВ-2, снижается от растяжения и пропитки. При пропитке большинства составов, особенно типа КП, эмалевая пленка проводов ПЭС-2 набухает и повреждается.

Провода ПЭВТЛ (эмалированные полиуретановым эмалевым лаком) имеют такие же толщину изоляции, механическую прочность и влагостойкость, как и провода ПЭВ-2, но более высокую стойкость к растворителям.

Нагревостойкость этих проводов несколько выше, чем эмалированных поливинилацеталевым лаком, однако они имеют самую низкую стойкость к тепловым ударам при температурах, близким к рабочим, и к перегрузкам по току, самую низкую термопластичность и резко снижают пробивное напряжение при повышении температуры (рис. 36, 37). Если для проводов ПЭВ, ПЭМ, ПЭТВ, ПЭТ-155, ПЭФ-155, ПЭТ-200, ПЭЛР допустимы кратковременные нагревы обмоток до 200°С (при предельно допустимой скорости нарастания температуры 3 °С/с), то для полиуретановых проводов недопустим кратковременный нагрев выше 180°С. Достоинством полиурета-

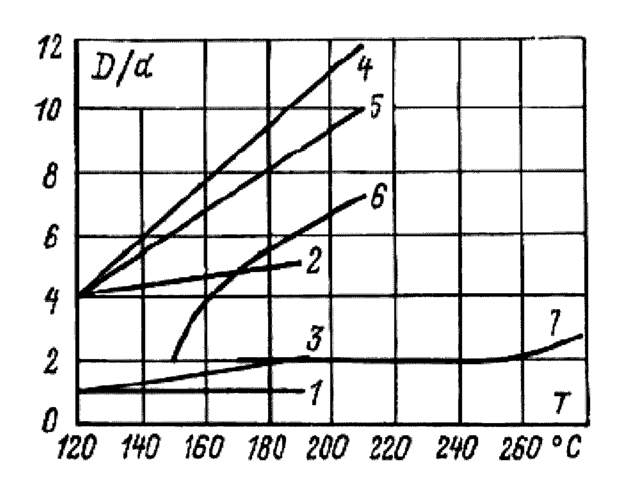


Рис. 36. Стойкость эмалевой изоляции проводов диаметром 1,62 мм к тепловому удару в зависимости от температуры:
1 — ПЭВПИ; 2 – ПЭВТЛ; 3 — ПЭМ-2; 4 — ПЭТВ (лак ПЭ-939); 5 — ПЭТВ (лак ПЭ-943); 6 — ПЭТ-155; 7 — ПНЭТимид

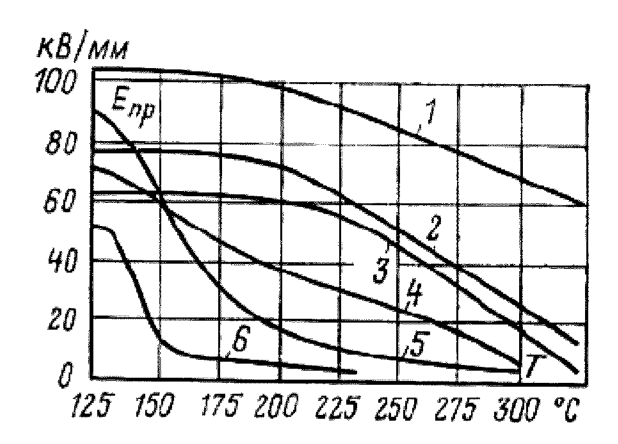


Рис. 37. Зависимость электрической прочности Епр эмалевой изоляции проводов от температуры Т: 1 — ПНЭТимид; 2 — ПЭТВ; 3 — ПЭВ-2; 4 — ПЭЛ; 5 — ПЭВТЛ; 6 — ПЭВПИ

новых проводов является способность лудиться без зачистки эмали и применения флюса, что особенно важно для проводов малых сечений, применяемых для обмотки якорей. По комплексу свойств полиуретановые эмалированные провода можно принять в машинах с нагревостойкостью не выше класса А, причем следует ограничиться диаметром провода 1 мм, т. к. с увеличением диаметра снижается стойкость эмалевой изоляции к тепловым ударам. Полиуретановая эмалевая изоляция в растянутом состоянии растрескивается в кипящей воде и ее парах.

Стойкость к тепловым ударам — способность изоляционного материала или изоляции без повреждения и существенного ухудшения практически важных свойств выдерживать действие резких изменений температуры проводов. Она характеризуется растрескиванием эмалевого покрытия после помещения в печь, нагретую до определенной температуры, навитых на оправку определенного диаметра образцов. Оценивается кратностью диаметров D/d — отношением диаметра навива, при котором появилась трещина в эмалевой пленке, к диаметру проволоки. Наибольшее распространение получили провода ПЭТВ, эмалированные полиэтилентерефталатными лаками ПЭ-939, ПЭ-943 и «Теребек Ф-35». Как показали испытания, по комплексу свойств такие провода практически равноценны (табл. 21).

К недостаткам проводов ПЭТВ следует отнести низкую стойкость к тепловому удару, значительное снижение стойкости к растворителям, особенно к кипящей воде, при увеличении относительного удлинения обмоток, снижение пробивного напряжения при растяжении и нагревостойкости проводов, растянутых на 10 % и более. Особенно снижается нагревостойкость проводов ПЭТВ в случае эмалирования их импортным лаком «Теребек Ф-35» (фирмы «Бек», Германия). В растянутом состоянии такие провода имеют нагревостойкость ниже класса Y, а в нерастянутом — F. В небольшом количесве выпускаются провода ПЭТВ-ТС, изготовляемые путем наложения расплава полиэфирного продукта марки ТС (аналогичного смоле лака ПЭ-939). Нагревостойкость обмоток из проводов ПЭТВ, как и других нагревостойких эмалированных проводов, в большей степени зависит, каким лаком обмотки пропитаны. Применяемые в настоящее время органические составы обычно снижают средние токи службы обмоток из проводов ПЭТВ, а некоторые, например КМ-18, вызывают преждевременный выход из строя обмоток. Поэтому провода ПЭТВ рекомендуется использовать для обмоток с нагревостойкостью класса В. Для механизированной намотки обмоток выпускают провода ПЭТВМ, эмалированные лаком ПЭ-939, но они фактически мало отличаются от проводов ПЭТВ (только имеют большую толщину эмали). В последнее время все более широкое применение находят эмалированные провода с изоляцией класса нагревостойкости F и выше. Такие провода эмалируют по-

Таблица 21

Нагревостойкость пропитанных обмоток статора

Марка и диаметр провода, мм	Лак и эмаль	Средний срок службы образцов, ч, при температуре, °С					ТИ $_{20000}$ °С
		125	150	170	198	210	
ПЭМ-2 1,38 (1-я партия)	МЛ-92	9500	1592	831	—	—	114
ПЭМ-2 1,35 (2-я партия)	МЛ-92	10062	1274	833	—	—	115
ПЭВ-2 1,25	МЛ-92	8204	1099	326	—	—	113
ПЭТВ-943	МЛ-92	—	—	7340	2263	1527	146
ПЭТВ-943	МГМ-8, ГФ-92ГС	—	9993	2304	1150	—	140
ПЭТВ-943 (3-я партия)	МГМ-8	—	20131	12343	1865	—	153
ПЭТВ-943 (3-я партия)	МГМ-8, ГФ-92ГС	—	8844	2304	1150	—	135
ПЭТВ-939	КП-34, ГФ-92ГС	—	9384	3044	1298	—	136
ПЭТВ-943	ПЭ-933	—	—	5628	1848	1634	132
ПЭТВ-F	МГМ-8	—	12286	2419	1106	—	137
ПЭТВ-F (2-я партия)	МГМ-8	—	10440	7703	1276	—	148
ПЭТВ-F (3-я партия)	МГМ-8	—	13348	1848	1076	—	143
ПЭТ-155	ПЭ-933	—	—	9502	3386	1314	157
ПЭТ-155	КП-34	—	—	7728	4580	912	150
ПЭТ-155	ПЭ-933	—	—	4874	1340	450	150
ПЭТ-155	КП-103	—	—	2860	1480	—	—
ПЭТ-155	КО-964Н	—	—	18144	4800	2488	—
ПЭТ-155	КО-916к	—	—	16464	6720	2688	—
ПЭТ-155	Б-ИД-9127	—	—	—	3120	1272	—
ПЭТ-155	ЭКД-14	—	—	6720	2760	1232	—
ПНЭТимид	КО-964Н	—	—	—	—	14952	—
ПЭТВ-939	КП-34	—	16759	4923	1740	—	147
ПЭТВ-939	МГМ-9	—	20135	1865	1268	—	150

лиэтилентерефталатными лаками, модифицированными полимерами амидной и имидной групп, что повышает их нагревостойкость и стойкость к тепловому удару. Эти провода имеют такую же толщину изоляции, как провода ПЭТВ, и идентичные им электрические свойства и стойкость к истиранию. Однако провода ПЭТ-155, эмалированные полиэфиримидным лаком ПЭ-955, обладают большей стойкостью к тепловым ударам и кипящей воде, чем провода ПЭТВ (см. рис. 36), они не растрескиваются при растяжении на 20 %, в то время как провода ПЭТВ растрескиваются при 10-процентном удлинении. У провода ПЭТ-155 в такой же мере снижается нагревостойкость при растяжении, как у провода ПЭТВ. Их электрическая прочность не снижается при нагреве вплоть до 150–180 °С, а у проводов ПЭТВ электрическая прочность уменьшается при 130 °С. Провода ПЭТ-155 можно успешно применять в электрических машинах класса нагревостойкости F при условии пропитки обмоток соответствующими лаками, например КО-916к и КО-964Н.

К общим недостаткам проводов с эмалевой изоляцией классов нагревостойкости А и В относится их термопластичность — размягчение эмалевой пленки при повышенных температурах, поэтому их не следует использовать во вращающихся обмотках машин малой мощности с частотой вращения более 5000 мин$^{-1}$, а также во вращающихся обмотках машин мощностью более 10 кВт. При конструировании обмоток из проводов ПЭТВ и ПЭТ-155 во избежание повреждения эмалевой изоляции при пропитке и сушке следует стремиться к возможно большим радиусам закругления, а при выборе режимов пропитки и сушки не превышать температуру 170 °С.

Провода ПЭФ-155, эмалированные полиэфиримидциануратным лаком ПЭ-999, лучше по своим свойствам проводов ПЭТ-155 и обладают холодостойкостью. Такие провода будут пригодны и для механизированной намотки обмоток под маркой ПЭТ-М (табл. 22.1 и 22.2).

Более нагревостойкими, чем провода ПЭТ-155 и ПЭФ-155, должны быть провода, эмалированные полиэфирамидимидным лаком. Они несколько более стойки и к перегрузкам по току, но механические свойства их хуже, чем у провода ПЭТ-155. Полиамидимидные провода имеют высокие механические и химические свойства (особенно сопротивление истиранию), стойкость к тепловым уда-

Таблица 22.1

Механические свойства эмалевой изоляции проводов

Провод	Диаметр провода, мм	Толщина изоляции (двусторонняя), мм	Адгезия (число оборотов провода)				Эластичность D/d
			в исходном состоянии	после 24 ч старения при температуре, °С			в исходном состоянии
				170	190	210	
ПЭТ-М	1,6	0,08	15	7	1	1	1
ПЭТ-200	1,45	0,07	11	6	6	3	1
ПЭТ-155	1,56	0,08	16	10	7	5	1
ПЭФ-155	1,0	0,08	20	16	16	12	1
ПЭТВ	1,0	0,08	18	13	6	7	1
ПЭД-180	1,25	0,07	23	—	23	—	1

Таблица 22.2

Механические свойства эмалевой изоляции проводов

Провод	Эластичность D/d после 24 ч старения при температуре, °С				Стойкость к тепловому удару D/d при температуре, °С				Стойкость к истиранию (число ходов при нагрузке В)
	170	190	210	230	170	190	210	230	
ПЭТ-М	2	9	11	—	2	3	3	4	142/87
ПЭТ-200	1	1	4	8	1	1	1	1	247/145
ПЭТ-155	4	6	14	—	2	6	7	—	49/30
ПЭФ-155	1	1	5	—	1	1	2	3	53/35
ПЭТВ	3	4	5	—	2	2	3	—	60/46
ПЭД-180	1	1	1	3	1	1	1	—	231/142

рам (1d) и темоэластичность (см. табл. 22.1, 22.2). Полиамидимидный лак дорог, поэтому за рубежом его используют в основном для покрытия полиэфиримидных проводов с целью повышения их механической прочности и химической стойкости. В нашей стране выпускаются провода ПЭТ-200, полностью эмалированные полиамидимидным лаком. Однако испытания показали их недостаточную стойкость к растяжению, низкую адгезию эмалевой пленки к меди провода, плохую совместимость с пропиточными составами, в том числе с КО-916к. Вместе с тем применение полиамидимидного лака в качестве верхнего слоя на проводе, эмалированном лаком ПЭ-955,

дает хорошие результаты (см. табл. 22.1, 22.2). Такой провод имеет марку ПЭД-180.

Некоторое применение получили провода с полиимидной изоляцией (ПЭТимид и ПНЭТимид). Они рассчитаны на длительную работу при 220°С (табл. 23).

Провода очень стойки к тепловым ударам (см. рис. 36), перегрузкам по току (рис. 38), растворителям и агрессивным средам. Недостатком полиимидных проводов является невысокая механическая прочность (стойкость к истиранию в 2 раза меньше, чем у проводов ПЭТВ). Провода марки ПНЭТимид, медь которых защищена от окисления никелем, более нагревостойки, чем ПЭТимид.

За рубежом выпускаются полигиданттоиновые провода с нагревостойкостью, промежуточной между нагревостойкостью полиэфиримидных проводов и полиимидных. Они имеют высокие температуру размягчения эмали и стойкость к тепловым ударам, но мало стойки к растворителям пропиточных лаков. При замене прямо-

Таблица 23

Нагревостойкость полиимидных проводов

Провода	Диаметр, мм	Средний срок службы, ч, при температуре, °С			$ТИ_{20000}$ °С
		230	250	280	
ПНЭТимид	1,62	20696	4758	580	230
ПЭТимид	1,1	9102	1275	343	216

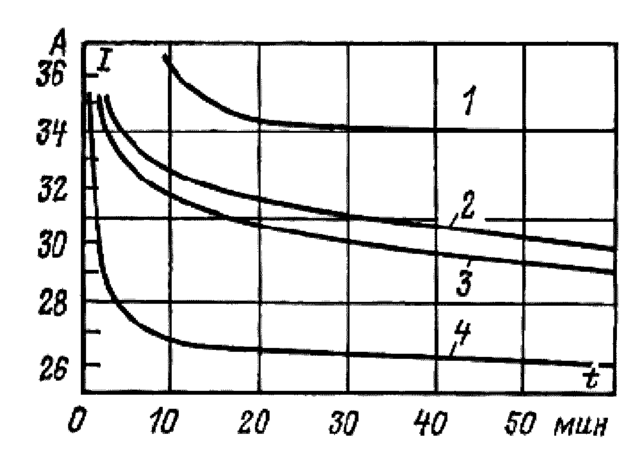


Рис. 38. Стойкость эмалированных проводов к перегрузкам по току в условиях свободного доступа воздуха к поверхности изоляции:
1 — ПНЭТимид; 2 — ПЭТ-155; 3 — ПЭТВ; 4 — ПЭВТЛ

угольных проводов ПБД и ПСД проводами с эмалевой изоляцией ПЭВП (лак ПЭ-931), ПЭТВП (лак ПЭ-939 и ПЭ-943) и ПЭТП-155 (лак ПЭ-955) благодаря уменьшению толщины изоляции и в результате лучшей теплопроводности мощность машины может быть повышена на 15 %. Надежность электрической машины при замене проводов ПБД и ПСД соответствующими по классу нагревостойкости эмалированными проводами не должна снижаться, т. к. изоляция эмалированных проводов не менее влагостойка и электрически прочна, чем волокнистая. В непропитанном состоянии при более высоком уровне среднего пробивного напряжения эмалевой изоляции минимальные значения пробивного напряжения эмалированных проводов ниже, чем проводов с волокнистой изоляцией. При пропитке лаком, например МЛ-92, среднее и минимальное пробивное напряжение эмалевой изоляции повышается значительно, волокнистой — меньше (рис. 39). Для достижения необходимого пробивного напряжения изоляции прямоугольных эмалированных проводов медная проволока этих проводов должна иметь больший радиус закругления углов, чем у проводов с волокнистой изоляцией, чтобы получить на ребрах эмалевую пленку достаточной толщины

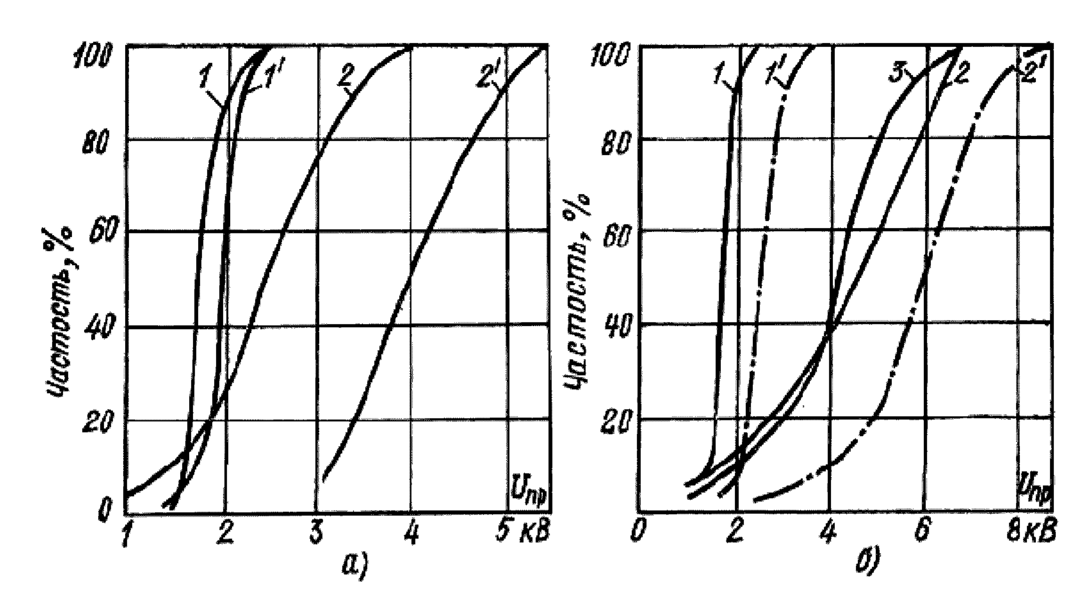


Рис. 39. Пробивное напряжение обмоточных проводов:
а — класса нагревостойкости А: 1, 1′ — провод ПБД; 2, 2′ — ПЭВП; б — класса нагревостойкости В: 1, 1′ — ПСД; 2, 2′ — ПЭТВП; 3 — ПЭТВП-939; 1–3 — непропитанные провода; 1′, 2′ — пропитанные лаком МЛ-92

и электрической прочности. Нежелательно применять эмалированные прямоугольные провода с отношением высоты к ширине от 1:1 до 1,8:1, т. к. из-за скользкой поверхности эмалированного провода и малой площади соприкосновения между витками (за счет радиусов закругления провода) затрудняется намотка обмоток, особенно катушечных, и при сечениях, близких к квадратному, в процессе намотки витки сдвигаются и «лодочка» рассыпается. Для изготовления полюсных катушек могут быть использованы провода ПЭВП (класс нагревостойкости А) и ПЭТВП (класс нагревостойкости В). Эластичность прямоугольных проводов ПЭТВП выше, чем проводов ПЭВП, но стойкость к тепловому удару ниже. Однако провода ПЭТВП имеют достаточный срок службы (табл. 24) и при ограничении провода по высоте, большом радиусе закругления обмотки (чтобы относительные удлинения не превышали 10 %) и равномерной толщине изоляции 0,09–0,15 мм могут успешно применяться для шаблонных обмоток и полюсных катушек класса нагревостойкости В.

Провода ПЭТП-155, эмалированные лаком ПЭ-955 (класс нагревостойкости F), выпускаются пока в ограниченном количестве. Они обладают несколько более высокой стойкостью к тепловым ударам и более высокой нагревостойкостью, чем провода марки ПЭТВП, поэтому их следует применять вместо последних в машинах класса нагревостойкости F. Важна разработка прямоугольных проводов

Таблица 24

Пробивное напряжение, В, изоляции проводов

Провода	Сечение, мм	В исходном состоянии		После старения при					
				170 °C — 280 сут		190 °C — 80 сут		210 °C — 40 сут	
		среднее	минимальное	среднее	минимальное	среднее	минимальное	среднее	минимальное
ПСД	2,44×5,1	2600	1900	800	290	1250	950	190	50
ПЭТВП (ПЭ-943)	2,44×5,1	3700	2000	600	250	750	650	220	100
ПЭТВП (ПЭ-943)	1,95×4,4	6200	3600	750	200	800	800	190	50
ПЭТВП (ПЭ-939)	1,95×4,4	3600	1600	780	560	800	800	220	80

с двусторонней толщиной эмалевой пленки 0,10–0,16 мм, как это предусмотрено рекомендациями МЭК. При двусторонней толщине эмалевой пленки менее 0,1 мм провода имеют низкое пробивное напряжение; при растяжении в петлях катушки оно еще более снижается, что приводит к витковым замыканиям. При двусторонней толщине эмалевой пленки 0,05 мм потеря электрической прочности при растяжении провода до 15 % достигает 50 % (рис. 40) в основном за счет малой толщины на ребрах. Не менее важными параметрами прямоугольных и круглых проводов являются адгезия и термоэластичность эмалевых пленок. Чем выше значения этих параметров, тем меньше снижается пробивное напряжение при растяжении провода (табл. 25).

Для катушек статоров асинхронных двигателей мощностью от 100 до 1000 кВт на напряжение 3300 и 6600 В также применяют провода ППЛБО, изолированные тремя слоями полиэтилентерефталатной пленки толщиной 0,02 мм и одним слоем хлопчатобумажной пряжи. Провода обеспечивают высокое пробивное напряжение витковой изоляции и надежный класс нагревостойкости А (рис. 41).

В качестве витковой изоляции электродвигателей на высокое напряжение класса нагревостойкости В, а также для машин тропического и химически стойкого исполнений до последнего времени

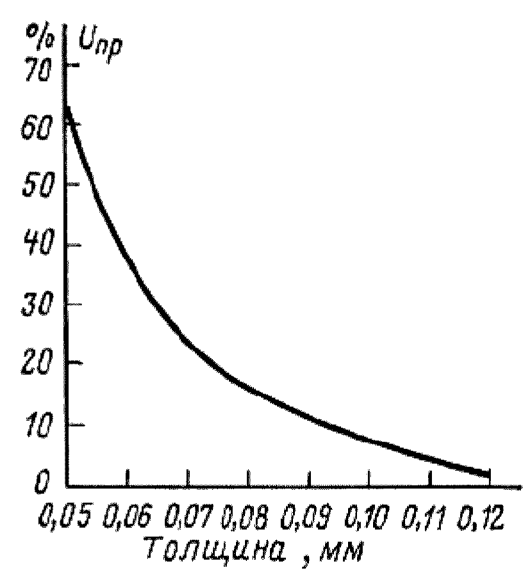


Рис. 40. Зависимость степени снижения пробивного напряжения эмалированного провода марки ПЭТВП, растянутого на 15 % от толщины эмалевой изоляции

Таблица 25

Пробивное напряжение прямоугольных проводов

Провод	Размер провода, мм	Толщина изоляции, мм		Пробивное напряжение, кВ				Потери Uпр при 15 % удлинения, %	Адгезия, 105 Па
		По стороне b	По стороне a	Исходное		После растяжения на 15 %			
				среднее	минимальное	среднее	минимальное		
ПЭТП-155	1,25×3,05	0,054	0,065	1,3	0,8	0,8	0,5	38	165
ПЭТП-155	1,0×3,05	0,095	0,124	5,9	2,5	3,3	1,0	44	84
ПЭТП-155	1,56×3,53	0,133	0,115	5,9	2,4	2,8	1,0	52	83
ПЭТП-155	1,68×4,4	0,148	0,132	6,7	4,6	3,1	0,8	54	55
ПЭТП-200	1,4×3,55	0,075	0,077	3,7	1,2	2,3	0,6	40	—
ПЭТП-200	1,0×3,55	0,07	0,055	1,7	0,8	0,8	0,3	53	—
ПЭТВП	1,25×3,28	0,07	0,05	1,5	0,8	0,8	0,3	47	—
ПЭТВП	1,56×4,1	0,12	0,08	2,8	1,0	2,5	1,0	11	—

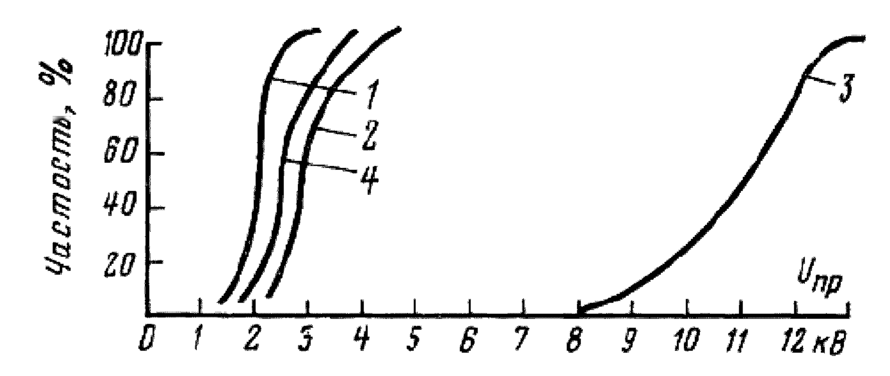


Рис. 41. Вероятность пробоя междувитковой изоляции компаундированных катушек высокого напряжения: 1 — витковая изоляция, выполненная из проводов ПБД с дополнительной изоляцией из микаленты ЛФЧ-ББ толщиной 0,13 мм вполнахлеста; 2 — ПСД с дополнительной изоляцией из микаленты ЛФЧ-ББ толщиной 0,13 мм вполнахлеста; 3 — ППЛБО; 4 — не компаундирован

применяется провод ПСД с дополнительной изоляцией из микаленты ЛФЧ-ББ толщиной 0,1 или 0,13 мм в 1/3 нахлеста или стеклослюдопластовой ленты ЛИФЧ-ББ. При изоляции провода микалентой происходит выкрашивание слюды, что приводит к снижению электрической прочности витковой изоляции. Кроме того, неплотности изоляции, образующиеся вследствие упругости микаленты, при компаундировании заполняются битумом, отчего толщина витковой изоляции может достигать 1 мм. Разработан провод марки ПЛС, изолированный двумя слоями стеклослюдинитовой ленты ЛСПЭ-934тп. После намотки «лодочки» из провода ПЛС и ее опрессования получается монолитная изоляция такой же толщины, как и при применении провода ППЛБО (рис. 42). Пробивное напряжение витковой изоляции катушек из провода ПЛС такое же, как и у катушек из провода ПСД с дополнительной микалентной изоляцией, но меньше, чем у катушек из провода ППЛБО. Провод ПЛС можно длительно эксплуатировать при температурах, близких к 155 °С (табл. 26).

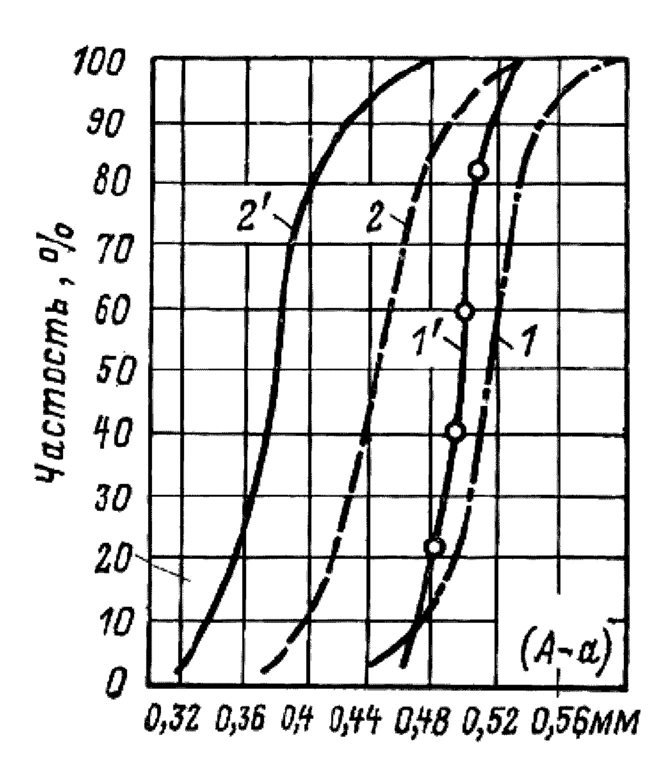


Рис. 42. Толщина витковой изоляции (А-а) из проводов ПЛС:
1, 1' — сечение по меди 1×5,1 мм; 2, 2' — сечение по меди 1,16×6,9 мм;
1, 2 — до опрессовывания; 1', 2' — после опрессовыван ия

Таблица 26

Средний срок службы витковой изоляции из проводов ППЛБО и ПЛС

Провода	Средний срок службы, ч, при температуре, °С				$ТИ_{20000}$ °С
	150	170	190	210	
ППЛБО	2915	1174	511	—	113
ПЛС	—	7482	3763	2003	144

В последнее время ряд предприятий для обмоток высокого напряжения классов нагревостойкости B и F применяют провода ПЭТВСД, эмалированные полиэфирным лаком и поверх обмотанные двумя слоями стекловолокнистой пряжи, проклееной глифталевым лаком и запеченной. Как показали исследования, провода в обмотках имеют большой разброс по пробивному напряжению, особенно после запекания, что свидетельствует, очевидно, о недостаточной стойкости изоляции к повышенным температурам. Вопрос совместимости эмалевой изоляции провода ПЭТВСД с пропитанной и проклееной стекловолокнистой обмоткой пока достаточно не изучен, и для обмоток высокого напряжения рекомендуется применять провода, аналогичные проводам ПЛС (со слюдинитовыми лентами на термореактивных связующих), или с нагревостойкой пленочной изоляцией (поликарбонатной, полиимидной и др.).

3.5. Электроизоляционные пропиточные материалы

Электроизоляционные пропиточные составы представляют собой жидкие в холодном состоянии составы, состоящие из пленкообразующих веществ (основы); растворителя пленкообразующих веществ (за исключением составов без растворителей); сиккативов — веществ, ускоряющих процессы отверждения лаковой основы; пластификаторов, придающих гибкость лаковой пленке. Вначале были разработаны лаки на основе битумов в сочетании с высыхающими растительными маслами. Эти лаки ранее широко применяли для пропитки обмоток из проводов с волокнистой изоляцией, когда нагрев обмоток во время эксплуатации не превышал 130 °С.

Лаки — это коллоидные растворы смол, битумов, высыхающих масел, составляющие так называемую лаковую основу в летучих

растворителях. В процессе изготовления изоляции их используют в жидком виде, но в готовой изоляции они находятся уже в твердом состоянии. При сушке лака растворитель улетучивается, а лаковая основа переходит в твердое состояние, образуя (в тонком слое) лаковую пленку. Таким образом, электроизоляционные лаки относятся к органическим диэлектрикам. Как правило, у этих материалов простая технология изготовления, их дешево производить по сравнению с неорганическими диэлектриками. Старение на постоянном напряжении практически отсутствует, на переменном напряжении стареют за счет частичных разрядов, дендритов и водных триингов. Лаки горючи, большинство из них малостойки к атмосферным и эксплуатационным воздействиям. Электроизоляционные лаки классифицируются по назначению, режиму сушки и по химическому составу. По назначению эти лаки можно разделить на три основные группы: пропиточные, покрывные, клеящие. Однако эта классификация условна и не исключает применения одного и того же лака по различным назначениям. Например, при изготовлении гетинакса и текстолита лак, пропитывающий отдельные слои бумаги или ткани и склеивающий эти слои друг с другом, является одновременно и пропиточным и клеящим. По режиму сушки электроизоляционные лаки подразделяются на лаки горячей (печной) и холодной (воздушной) сушки. Первая группа требует для получения оптимальных свойств лаковой пленки применения температур сушки выше 70°С. Лаки холодной сушки достаточно хорошо высыхают при температуре около 20°С, однако для ускорения можно производить сушку и при повышенной температуре (60÷80°С). Для изоляции лаков электрических машин и аппаратов, работающих при температурах 105–180°С и выше, предпочтительнее применение горячей сушки. По химическому составу лаковой основы электроизоляционные лаки делятся на три основные группы: маслосодержащие лаки, лаки на основе модифицированных и немодифицированных синтетических полимеров, лаки на основе природных смол и эфиров целлюлозы. Последние используются относительно редко, ведь предпочтительнее использовать лаки из синтетических полимеров, более дешевых в производстве и ничем не уступающих в свойствах природным.

Лаки нетермореактивны и плохо высыхают в глубинных слоях обмоток, т. к. этот процесс происходит в результате окисления двой-

ных связей высыхающих масел кислородом воздуха. Из-за большого количества битума в составе основы они немаслостойки и имеют низкую цементирующую способность. Необходимость ускорения процесса пропитки и создание новых типов электрических машин для более тяжелых условий эксплуатации привели к разработке лаков на основе синтетических смол. Большинство таких лаков по сравнению с лаками из натуральных смол обладает повышенными влаго-, кислото- и щелочестойкостью и хорошей цементирующей способностью. Лаки на основе синтетических смол твердеют при сшивании молекул; после сушки их пленка становится неплавкой и нерастворимой. Лаки на основе синтетических смол, полностью высыхающие в глубинных слоях обмоток, незаменимы для пропитки обмоток, доступ воздуха в которые затруднен. Ряд лаков (нитроглифталевые, масляно-глифталевые и др.) представляет собой комбинации пленкообразующих веществ и пластификаторов. Масляно-битумные лаки в настоящее время почти не применяют, их целесообразно использовать, когда требуется не столько сцементировать обмотку, сколько повысить пробивное напряжение и влагостойкость ее изоляции, как, например, в катушечных обмотках из проводов ПБД. Масляно-битумные лаки непригодны для пропитки обмоток из эмалированных проводов из-за плохой адгезии к эмалевой изоляции.

Лаки БТ-988 и БТ-987 изготовляют из специального ухтинского битума, уваренного льняного масла и сиккатива. Растворителями лака являются смесь ксилола с уайт-спиритом в соотношении 1:1, а также смеси, содержащие бензин, толуол, сольвент-нафту и скипидар. Лаки обладают достаточной влаго- и кислотостойкостью. К недостаткам их относятся непросыхание в толстом слое, низкая цементирующая способность и немаслостойкость. Лак БТ-988 можно применять для пропитки обмоток электрических машин и аппаратов с изоляцией класса А, работающих в условиях нормальной окружающей среды (провода ПБД, ПЭЛБО). Преимуществом лака БТ-988 является сравнительно быстрое высыхание при 105–120 °С. Лак БТ-987 обладает более высокими, чем лак БТ-988, электроизоляционными свойствами, нагрево- и влагостойкостью и образует более эластичную пленку. Его применяют для пропитки обмоток с волокнистой изоляцией классов нагревостойкости А (провода ПБД,

ПЭЛБО) и В (провод ПСД). Лак БТ-987 требует более длительного времени сушки, чем лак БТ-988. Если лак используют для пропитки обмоток с изоляцией класса нагревостойкости В, то время сушки может быть сокращено путем повышения температуры до 130–140°С. Лак можно применять для пропитки обмоток влагостойкого исполнения. Лак БТ-980 — жирный пропиточно-покрывной печной сушки, его изготовляют из специального битума, оксидированных льняного и тунгового масел с небольшим количеством сиккатива. Растворителями служат смесь ксилола с уайт-спиритом, а также смеси толуола, бензина, сольвент-нафты и скипидара. Время сушки обмоток, пропитанных лаком БТ-980, больше, чем обмоток, пропитанных лаком БТ-987. Лак имеет высокую влагостойкость и применяется для пропитки обмоток, работающих в атмосфере повышенной влажности, но в толстом слое не высыхает.

Лак ГФ-95 — светлый масляно-глифталевый пропиточный печной сушки. Его основу изготовляют путем поликонденсации глицерина и фталевого ангидрида, модифицированных жирными кислотами льняного масла, канифолью и касторовым маслом. Растворителем лака служат толуол, ксилол и скипидар. Лак ГФ-95 стоек к действию горячего минерального масла. Применяется он для пропитки обмоток с изоляцией класса нагревостойкости В и обмоток, работающих в трансформаторном масле. Он требует более длительного времени и более высокой температуры сушки (130–150 °С), чем лаки БТ-988 и БТ-987. К недостаткам лака относятся очень медленное присыхание в глубинных слоях обмоток (он так же, как и масляно-битумные лаки, сохнет в результате окисления двойных связей высыхающего масла) и повышенная кислотность. Лак пригоден для пропитки обмоток машин химически стойкого и тропического исполнений. Для улучшения высыхания и увеличения пропитывающей и цементирующей способности лак ГФ-95 сочетают со смолами К-225-02 и К-421-02. Меламиноформальдегидные смолы способствуют сшиванию молекул при сушке и образованию трехмерной структуры, сокращают время высыхания и отверждения лака (табл. 27).

При этом происходит снижение вязкости лака, что дает возможность применять его с большим количеством нелетучих. Это позволяет получать лучшее заполнение обмоток лаковой основой за меньшее число пропиток. Кроме того, повышаются пробивное

Таблица 27

Зависимость свойств лака ГФ-95 от добавления в него меламиноформальдегидной смолы

Параметр	ГФ-95	ГФ-95+10 % смолы	ГФ-95+15 % смолы
Время высыхания при 100–105 °С, мин	90	90	45
Теплостойкость при 150 °С, ч	56	40	28
Пробивная напряженность, МВ/м:			
в исходном состоянии	87	—	93
после 24 ч пребывания в воде	44	—	49

напряжение, влаго- и маслостойкость, твердость, прочность на удар и цементирующая способность (рис. 43), но при этом эластичность лаковой пленки несколько снижается. Лак МЛ-92 представляет собой смесь лака ГФ-95 и меламиноформальдегидной смолы К-421-02 в растворе бутанола (84 % основы лака ГФ-95 и 16 % смолы). Он хорошо сохнет в толстом слое, масло- и влагостоек; применяется в тех случаях, когда требуется хорошая цементация обмоток. Разбавите-

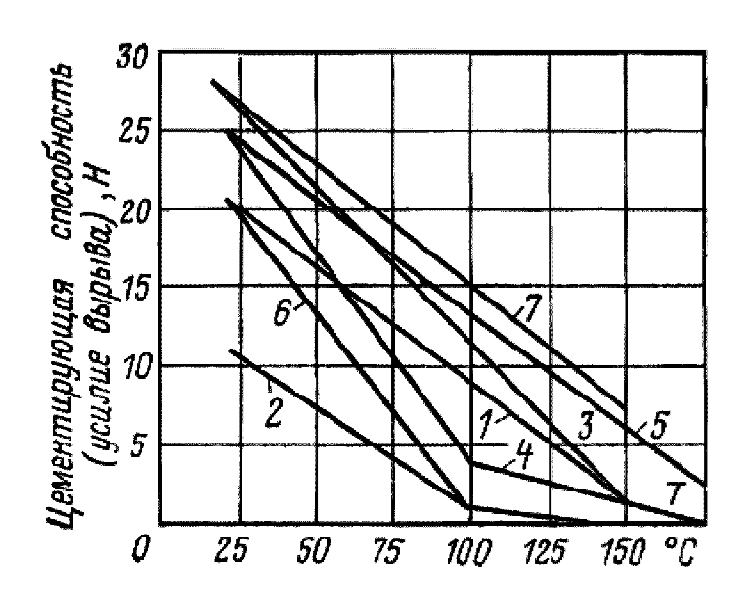


Рис. 43. Зависимость цементирующей способности пропиточных лаков от температуры: 1 — КФ-95; 2 — БТ-987; 3 — ФА-97; 4 — ФЛ-98; 5 — КО-916; 6 — ГФ-95; 7 — МЛ-92

лем лака служит ксилол или толуол или смесь их с уайт-спиритом. Лак пригоден для пропитки обмоток с изоляцией классов нагревостиойкости А, Е и В. Лак МГМ-8 (92 % основы лака ГФ-95 и 8 % смолы) более эластичен, чем лак МЛ-92, сохнет при 130–150 °С дольше, чем лак МЛ-92, но быстрее, чем ГФ-95. При повышенной температуре у лаков МЛ-92, МГМ-8 и ГФ-95 значительно снижается удельное электрическое сопротивление. Однако в процессе работы машины лаки запекаются и их цементирующая способность и сопротивление изоляции при рабочей температуре повышаются. Лаки МГМ-8 и МЛ-92 могут быть применены для пропитки обмоток под вакуумом и давлением на установках АВБ (рис. 44). Они пригодны для пропитки обмоток тропического и химически стойкого исполнений. Для обмоток, претерпевающих значительные центробежные и электродинамические усилия, разработаны термореактивные алкиднофенольные лаки ФА-97 и ФЛ-98, которые высыхают в толстом слое. Лак ФА-97 представляет собой раствор смеси алкидной и бу-

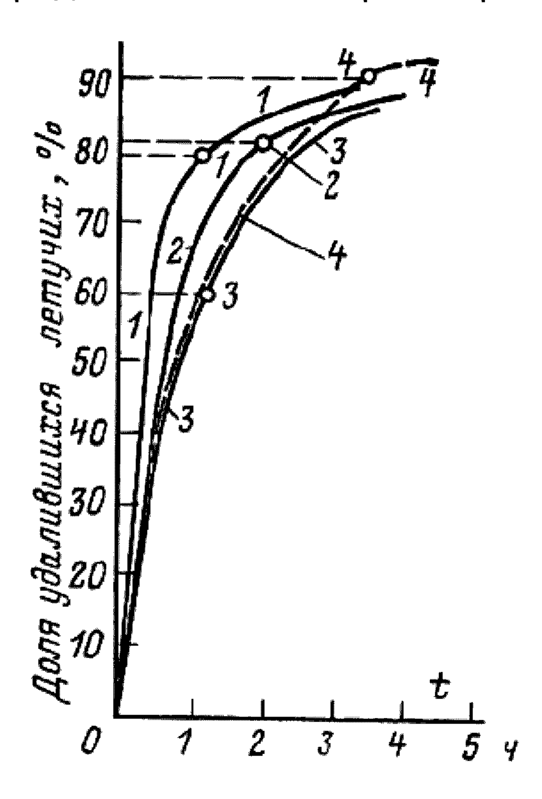


Рис. 44. Удаление летучих в процессе желатиниз ации лаков:
1 — лак КО-916к при 210 °С; 2 — КО-964н при 150 °С; 3 — МЛ-92 при 140 °С;
4 — ПЭ-933 при 150 °С; ¤ — точка желатинизац ии

тилфенолоформальдегидной смол в ксилоле. Лак термореактивный, маслостойкий, обладает высокой цементирующей способностью и может быть пригоден для пропитки обмоток с изоляцией классов нагревостойкости А, Е и В, когда требуется повышенная цементирующая способность. Сушка после пропитки должна производиться при 120–140°С; время сушки более длительное, чем при пропитке лаком БТ-987. Лак пригоден для пропитки обмоток тропического исполнения.

Лак ФЛ-98 — смесь растворов смол алкидной АК и бутоксикрезолоформальдегидной РБ в смеси ксилола и уайт-спирита в соотношении 1:1. В лаке содержится 10–15 % бутанола. Он термореактивный, обладает высокой цементирующей способностью и маслостойкостью. Лак предназначен для пропитки обмоток с изоляцией классов нагревостойкости А, Е и В при необходимости получения повышенной цементирующей способности. Время и температура сушки такие же, как и при пропитке лаком ФА-97. Пригоден для пропитки обмоток машин тропического исполнения. Не рекомендуется применять лак ФЛ-98, содержащий в своем составе бутанол, для пропитки обмоток из проводов марки ПЭВ, изоляцию которых он разрушает. Не рекомендуется использовать его и для обмоток с проводами ПЭТВ, т. к. жесткий лак ФЛ-98 снижает срок службы системы изоляции. Обмотки, пропитанные лаками ФА-97 и ФЛ-98, сохнут дольше, чем обмотки, пропитанные лаком БТ-987; сопротивление изоляции одинаковых обмоток в процессе сушки и после нее ниже, чем для лака БТ-987. В дальнейшем в процессе эксплуатации сопротивление изоляции обмоток повышается.

При отсутствии повышенных механических нагрузок более высокие сроки службы витковой и корпусной изоляции обеспечивают лаки МГМ-8 и МЛ-92, чем лак ФЛ-98. В отличие от лаков МЛ-92 и МГМ-8, которые, высыхая в толстом слое, размягчаются при нагревании и крошатся при изломе, лаки ФА-97 и ФЛ-98 при нагревании не размягчаются и остаются эластичными в изломе. Лаки имеют низкую вязкость при сравнительно высоком содержании пленкообразующих, и их следует применять при содержании пленкообразующих 50–55 %, что обеспечивает удовлетворительное наполнение обмотки лаковой основой. Несмотря на то, что масляно-битумные и меламиноглифталевые лаки применяются при содержании плен-

кообразующих в пределах 35–45 %, а лаки ФА-97 и ФЛ-98 — при 50–55 %, заполнение обмотки их лаковой основой за одинаковое число пропиток при применении лаков ФА-97 и ФЛ-98 не повышается, что объясняется значительным их вытеканием при разогреве в первый период сушки после пропитки обмоток. Несмотря на большее содержание пленкообразующих, для лаков ФА-97 и ФЛ-98 требуется такое же число пропиток, как для масляно-битумных и меламиноглифталевых. Цементирующая способность лаков ФА-97 и ФЛ-98 высокая (рис. 45). Проведенные опыты показали, что при увлажнении изоляции обмоток, пропитанных лаками ФА-97 и ФЛ-98 (пазовая изоляция из гибкого миканита марки ГФЧО и двух слоев электрокартона), ее влагостойкость была ниже, чем у обмоток, пропитанных лаками БТ-987 и 321т, но уже после непродолжительного теплового старения влагостойкость изоляции, пропитанной лаками ФА-97 и ФЛ-98, значительно повысилась (рис. 46 а, б).

Лак КФ-95 — это раствор подвергнутых полимеризации смешанных глицеридов канифоли и тунгового масла в органических растворителях (толуоле, ксилоле, сольвент-нафте или смеси их с бензином и уайт-спиритом). Сохнет в результате окисления двойных связей тунгового масла, т. е. так же, как и масляно-битумные лаки, не высыхает в толстом слое. Отличается от масляно-битумных лаков мас-

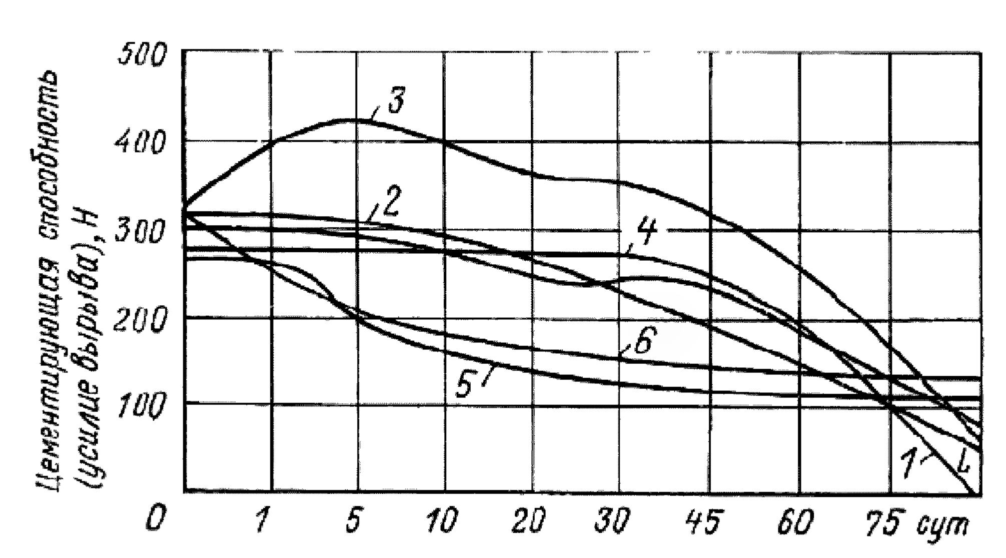


Рис. 45 — Изменение цементирующей способности лаков в процессе теплового старения при 170 °С (2, 3), 180 °С (1, 4) и 220 °С (5, 6):
1 — МГМ-8; 2 — ФЛ-98; 3 — ФА-97; 4 — ПЭ-934; 5 — ЭФ-3БСУ; 6 — КО-916к

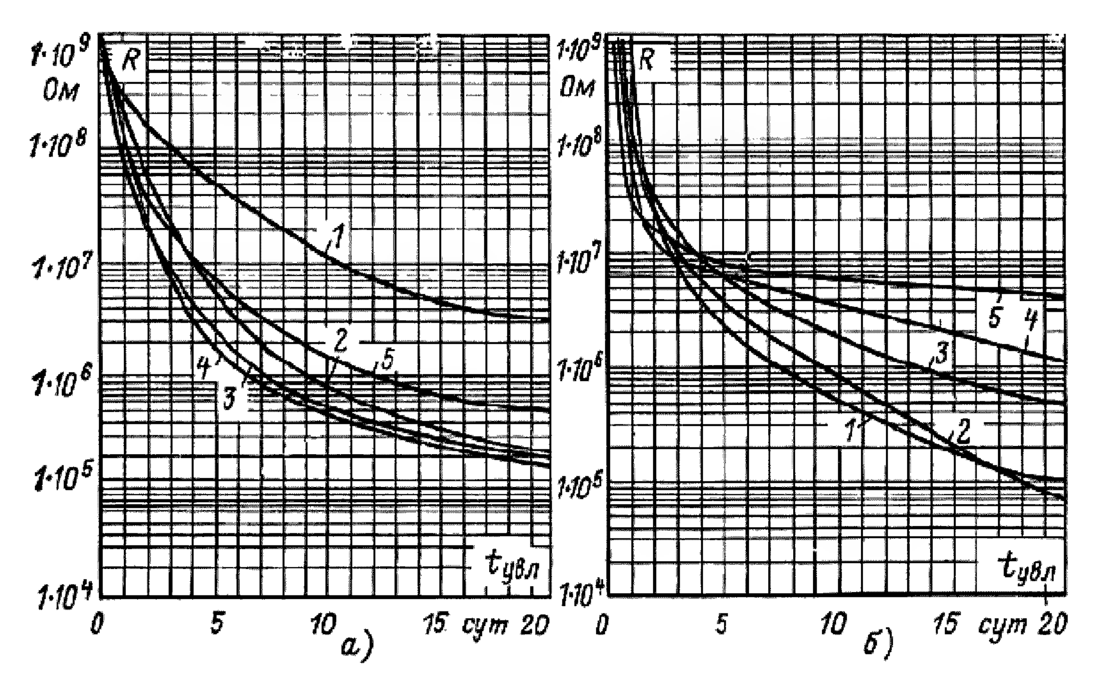


Рис. 46. Зависимость электрического сопротивления изоляции обмотки статора R от времени пребывания в атмосфере 98-процентной относительной влажности $t_{увл}$ при 20–25 °С: а — до старения; б — после старения в течение 45 сут; изоляция — провод ПЭВ-2, электрокартон ЭВ, гибкий миканит ГФЧ-ББ, пропитана: 1 — 2 раза лаком БТ-987; 2 — 2 раза лаком 321т; 3 — 3 раза лаком ФЛ-98 с содержанием нелетучих 35 %; 4 — 2 раза лаком ФЛ-98 с содержанием нелетучих 50 %; 5 — 2 раза лаком ФЛ-97

лостойкостью и более высокой цементирующей способностью. Его можно применять для пропитки обмоток классов нагревостойкости А и Е. В связи с появлением более термореактивных лаков МЛ-92, ФА-97, ФЛ-98 лак КФ-95 практически используется редко.

Лак ПЭ-933 представляет собой блок-сополимер на основе полиэфиров полигликольглицеротерефталата, полиглицероадипината и эпоксидной смолы (ЭД-40 или ЭД-20) с отвердителем — бутоксикрезолоформальдегидной резольной смолой РБ. Растворитель лака — смесь этилцеллозольва и ксилола в соотношении 1:1. Лак применяется для пропитки обмоток машин с изоляцией класса нагревостойкости F. Он обладает высокой цементирующей способностью, высокой влаго-, тропико-, маслостойкостью (рис. 47–49). Эластичность лака ПЭ-933 при 150°С сохраняется в течение 400–600 ч, при 180°С — 24–28 ч, а потеря массы после пребывания образцов в течение 1440 ч при 180°С составляет 18–28 %. После 60 сут старения при 220°С усилие

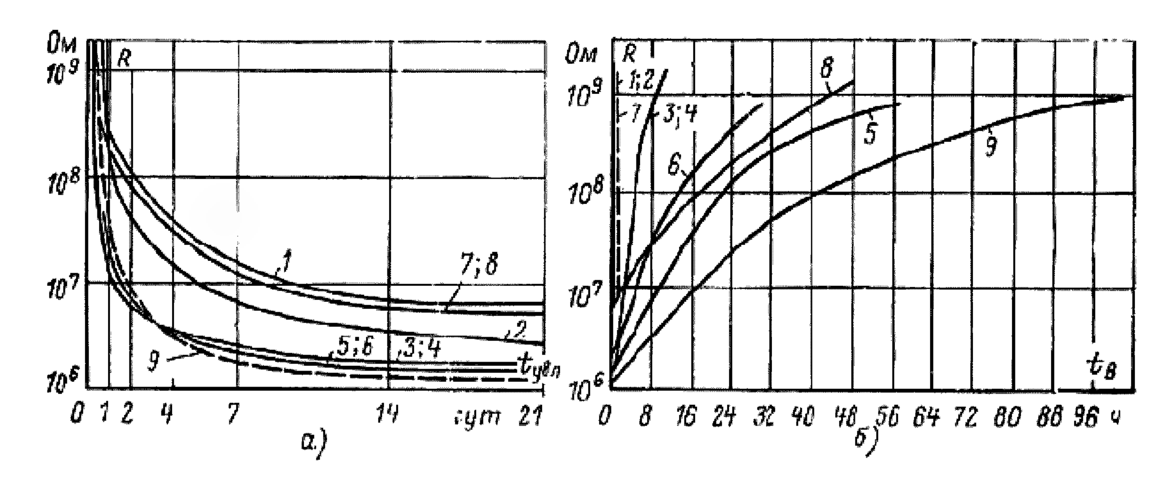


Рис. 47. Зависимость электрического сопротивления корпусной изоляции R времени пребывания в атмосфере 98-процентной относительной влажности $t_{увл}$ (а) и восстановление ее сопротивления в зависимости от времени пребывания $t_в$ на воздухе (б): 1 — лак ПЭ-933, выкладка паза стеклолакотканью ЛСП; 2 — то же, ЛСБ; 3 — МГМ-8, ЛСБ; 4 — МГМ-8, ЛСП; 5 — ПФЛ-$8_в$, ЛСБ; 6 — то же, ЛСЭ; 7 — ФЛ-98, ЛСБ; 8 — то же, ЛСЭ; 9 — КП-18, ЛСБ

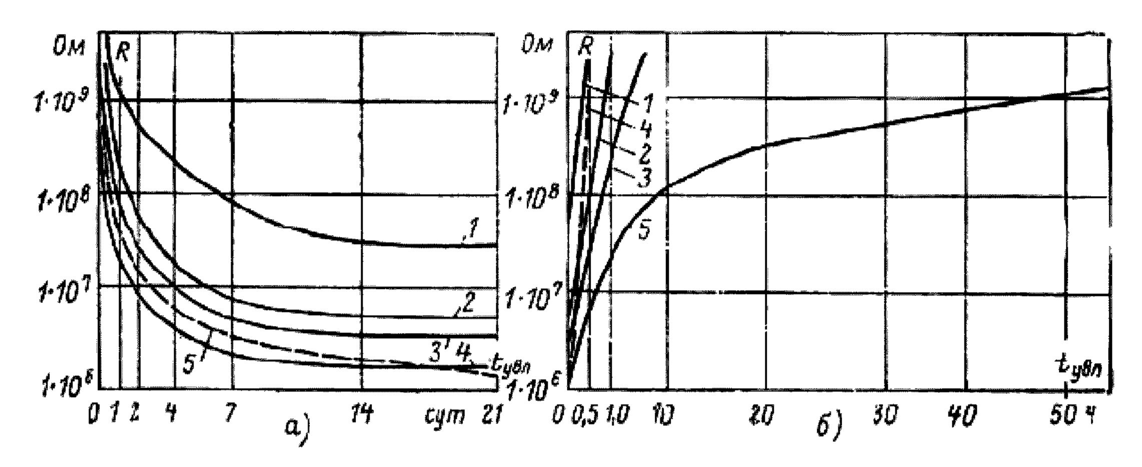


Рис. 48. Зависимость сопротивления витковой изоляции R от времени пребывания в атмосфере 98-процентной относительной влажности (а) и последующего времени нахождения в атмосфере 60-процентный относительной влажности $t_{увл}$ при 20 °С (б): Изоляция пропитана: 1 — лаком ПЭ-933; 2 — МГМ-8; 3 — ПФЛ-8в; 4 — ФЛ-98; 5 — КП-18

вырыва проводника из паза макета, пропитанного лаком ПЭ-933, было более 2500Н, а макета, пропитанного кремнийорганическим лаком ЭФ-3БСУ, после 60 сут старения при 200°С — 370Н. Лак надежно обеспечивает класс нагревостойкости изоляции F при пропитке им обмоток из проводов марки ПСД с нагревостойкой пазовой изо-

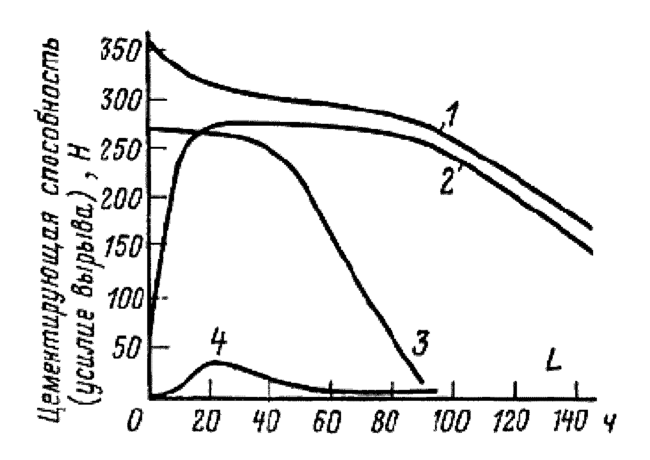


Рис. 49. Зависимость цементирующей способности пропиточных лаков от времени старения L при 180 °С: 1 — ПЭ-933 при 20 °С; 2 — то же при 155 °С; 3 — МГМ-8 при 20 °С; 4 — то же при 155 °С

ляцией. Но несмотря на то, что лак ПЭ-933 более нагревостоек, чем лак МГМ-8, сроки службы обмоток из проводов ПЭТВ, пропитанных этими лаками, получаются одинаковыми, т. к. эластичность лака ПЭ-933 после непродолжительного старения резко падает по сравнению с эластичностью эмалевого лака (табл. 28.1 и 28.2).

Лак ПЭ-933 не следует рекомендовать для пропитки обмоток из эмалированных проводов, т. к. он снижает срок службы системы изоляции. Лак ПЭ-933 необходимо подвергать ступенчатой сушке при 110–120 °С (для удаления растворителей) и 150–160 °С (для запекания). Общая продолжительность сушки лака не больше, чем лака МЛ-92 при 125–130 °С (рис. 50). Лак ПЭ-933 можно приме-

Таблица 28.1

Изменение параметров лаковых пленок в процессе теплового старения

Лак	Потери массы за 80 сут, %			Снижение разрывной прочности, сут/ %		
	при температуре, °С					
	170	190	210	170	190	210
МЛ-92	25	46	—	280/66	70/100	–/–
ПЭ-933	13	22	28	280/0	–/–	70/0
КО-916к	—	12	22	–/–	280/56	–/–
ПЭ-943	—	—	13	280/0	–/–	70/0

Таблица 28.2

Изменение параметров лаковых пленок в процессе теплового старения

Лак	Снижение пробивного напряжения, сут/ %			Снижение относительного удлинения, сут/ %		
	при температуре, °С					
	170	190	210	170	190	210
МЛ-92	60/50	16/50	–/–	280/66	60/100	–/–
ПЭ-933	90/0	–/–	60/40	280/50	–/–	70/75
КО-916к	–/–	97/50	75/40	–/–	280/20	70/60
ПЭ-943	120/0	–/–	65/0	380/0	–/–	70/50

нять для пропитки обмоток под вакуумом и давлением на установках АВБ, что позволяет значительно сократить цикл их пропитки и сушки.

В течение ряда лет в электротехнической промышленности имел значительное применение водоэмульсионный лак 321т, кото-

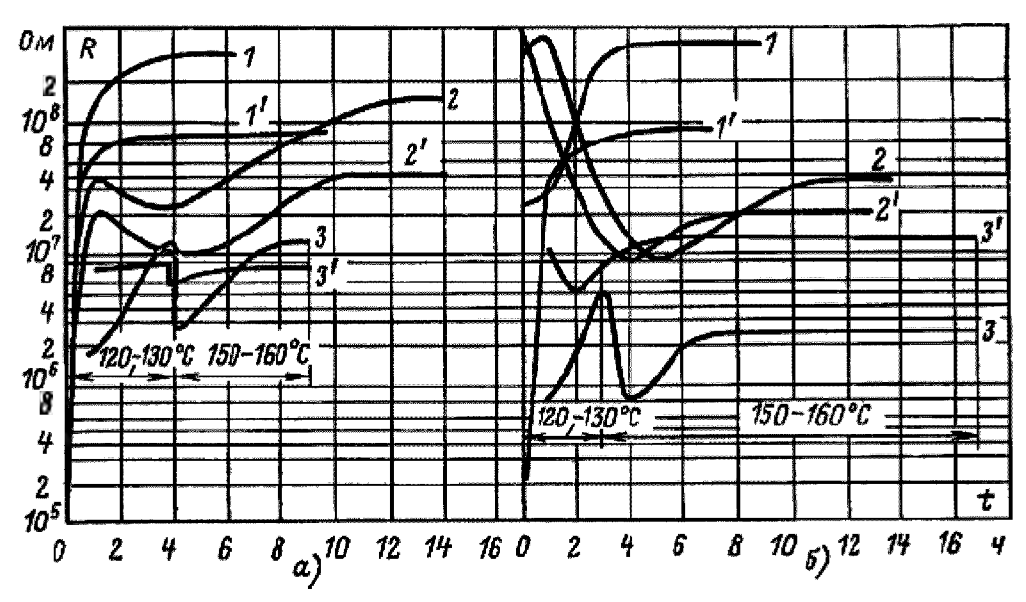


Рис. 50. Зависимость сопротивления R изоляции статоров (провод ПЭТВ, пазовая изоляция — гибкий миканит ГФС, стеклолакоткань ЛСБ) от времени сушки t (для МГМ-8 и ПФЛ-8а — при 125°С, для ПЭ-933 — ступенчатая при 125 и 150–160 °С): а — после первой пропитки; б — после второй пропитки; 1, 1' — ПФЛ-8а; 2, 2' — МГМ-8; 3, 3' — ПЭ-933; 1–3 — сопротивление витковой изоляции ; 1', 2', 3' — сопротивление корпусной изоляции

рый получается эмульгированием лакоосновы в воде с добавлением эмульгатора ОП-10 и аммиака. Основа лака 321т — продукт полимеризации смешанных глицеридов канифоли и тунгового масла с добавлением сиккатива. Лак 321т не высыхает в толстом слое. Его можно ограниченно применять для пропитки обмоток классов нагревостойкости А, Е и В. Время сушки обмоток, пропитанных лаком 321т, такое же, как лаком БТ-988, но температура сушки должна быть не ниже 120 °С (для ускорения испарения воды). Водоэмульсионный лак можно рекомендовать только для пропитки обмоток из проводов с эмаль-волокнистой изоляцией ПЭЛБО, ПЭЛШО. Пропитка обмоток из провода ПБД этим лаком не рекомендуется, т. к. не получается хорошей пленки на хлопчатобумажной пряже и после сушки она становится хрупкой. Лак 321т получил широкое применение до разработки термореактивных лаков благодаря нетоксичности и пожарной безопасности, к тому же он заменил масляно-битумные лаки для пропитки обмоток с эмалированными проводами марки ПЭВ благодаря большой адгезии к эмалевой пленке, что повысило степень цементации обмоток и пробивное напряжение витковой изоляции. Однако вода более активно, чем ксилол, действует на винифлексовую изоляцию (провод ПЭВ), а также на полиэфирную (провод ПЭТВ) и полиуретановую (провод ПЭВТЛ), особенно если провода находятся в напряженном состоянии (что неизбежно при намотке обмоток). Новые термореактивные лаки, обладающие хорошей адгезионной способностью к эмалированным проводам, заменили лак 321т для пропитки обмоток из этих проводов. Срок службы обмоток из эмалированных проводов ПЭТВ, пропитанных водоэмульсионным лаком, в 1,5–3 раза меньше, чем пропитанных лаком МГМ-8/, что объясняется возникновением дефектов в полиэтилентерефталатных пленках от воздействия кипящей воды и развитием их в процессе теплового старения. Недопустима пропитка водоэмульсионным лаком узлов с изоляцией, содержащей гибкий миканит на глифталевом лаке, реагирующем с водой, или со слюдинитовой и слюдопластовой изоляцией, т. к. материалы на основе слюдяных бумаг набухают в воде и разрушаются.

Кремнийорганический лак КО-916к представляет собой раствор полиметилфенилсилоксановой смолы, модифицированной полиэфиром в ксилоле. Применяется для пропитки обмоток с изоляцией

классов нагревостойкости F и H. Пригоден для пропитки обмоток влаго- и холодостойкого, тропического и химически стойкого исполнения. Сушка лака должна быть ступенчатой: 3–4 ч при 100–120 °С и при 200–220 °С для запечки. Растворителем лака является ксилол. В случае применения кремнийорганических лаков в коллекторных машинах закрытого исполнения и с замкнутым циклом вентиляции во избежание повышенного износа щеток, приводящего к нарушению коммутации, следует сушить обмотки после пропитки лаком КО-916к при 200–220 °С. Время сушки зависит от конструкции узла. Повышение температуры сушки приводит к улучшению влагостойкости изоляции обмоток. До последних лет для пропитки обмоток применялся кремнийорганический лак ЭФ-3БСУ, который был снят с производства вследствие недостаточной нагревостойкости (класс F) (табл. 29) и повышенной летучести, что приводило к недопустимому износу щеток, и заменен лаком КО-916к.

Разработаны лаки КО-964 и КО-964Н. Лак КО-964 менее летуч в процессе теплового старения и не менее влагостоек, чем лак КО-916к. Сушка обмоток, пропитанных лаком КО-964, производится при тех же температурах и за то же время, что и при пропитке лаком КО-916к. Растворителем является ксилол. После введения в лак КО-964 специального катализатора он высыхает при 150 °С. Марка этого лака КО-964Н. Он очень перспективен для пропитки обмоток классов нагревостойкости F и H с обмотками из эмалированных проводов. Лак КО-964Н прекрасно совмещается с эмалированными проводами ПЭТВ, ПЭТ-155, ПЭФ-155 и др. благодаря его способности не вызывать в процессе теплового старения резкого повышения внутренних напряжений в пленках эмалевых лаков.

Таблица 29

Нагревостойкость лаковых пленок
(снижение эластичности в процессе теплового старения)

Лак	Термоэластичность, ч, при температуре, °С		
	180	200	220
КО-916к	910	300	60
ЭФ-3	65	16	5
ФА-97	—	3	—
БТ-987	3	0	0

Нагревостойкость обмоток из эмалированных проводов при пропитке лаком КО-964Н максимально повышается. По влагостойкости лак КО-964Н равноценен лакуКО-916к (рис. 51, 52). Обмотки, пропитанные лаком КО-964Н, следует сушить ступенчато в зависимости от габаритов — для малых машин начиная с 60–80 °С, для машин с высотой центров 250 мм и более — со 120 °С. Такая сушка необходима, чтобы исключить вспенивание лака, которое лучше предотвращать введением в него при изготовлении антивспенивателя. После предварительной сушки при пониженной температуре в течение 2–4 ч следует поднять температуру до 150 °С. Общее время сушки такое же, как лака КО-916к при 200–220 °С. Лаки КО-916к и КО-964Н можно использовать для пропитки на установках типа АВБ. Разработан лак класса нагревостойкости Н на основе полимеров дифенилового эфира (типа «дорил») марки ДФ-971. Он придает изоляции высокие механические свойства и высокую холодостойкость.

Необходимость зачистки поверхности узлов, особенно в случае крупносерийного производства машин невысокой мощности, побудила перейти на метод струйной пропитки, когда пропиточный состав, направляемый струей в пазы узла, проникает вглубь обмотки и подвергается быстрому запеканию. Применяемые для этой цели составы должны быть способны к быстрой желатинизации и не содержать растворителей. К таким составам относятся компаунды.

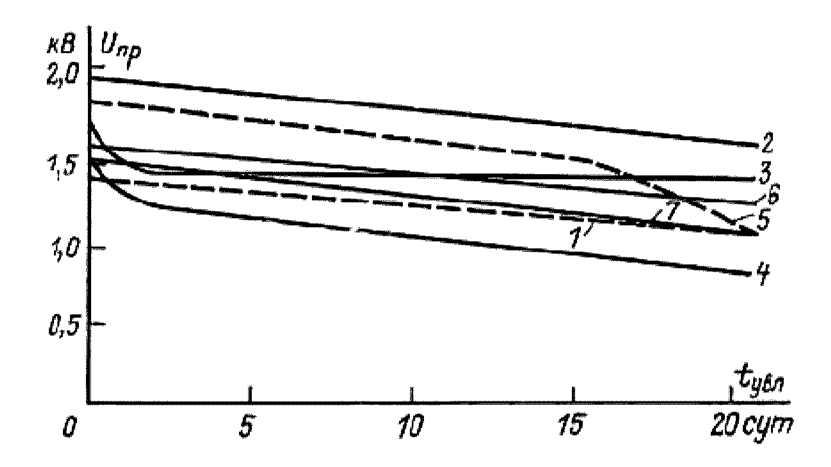


Рис. 51. Зависимость среднего пробивного напряжения $U_{пр}$ витковой изоляции катушек из проводов марки ПСДК от времени увлажнения $t_{увл}$:
1 — не пропитаны; 2–4 — пропитаны лаком КО-916к 2 раза; 5–7 — пропитаны лаком КО-964Н; 2, 5 — в исходном состоянии; 3, 6 — после старения 28 сут при 230°С; 4, 7 — после старения 56 сут

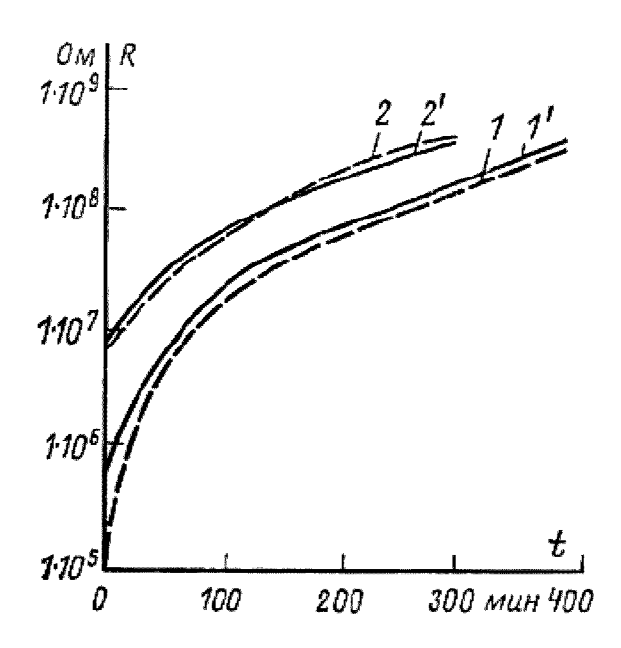


Рис. 52. Восстановление сопротивления R изоляции статоров с высотой центров 280 мм на воздухе (изоляция паза — гибкий стеклослюдинит марки $Г_2СП$ + электронит + стеклолакоткань ЛСБ, витковая — провод ПЭТВ, междуфазная — стеклолакослюдопласт ГИТ-Т-ЛСБ):
1, 1' — пропитка лаком КО-916к; 2, 2' — пропитка лаком КО-964Н;
1, 2 — междуфазная изоляция; 1', 2' — пазовая изоляция

Компаунды — не содержащие растворителей пропиточные и заливочные массы, находящиеся в момент их применения в жидком состоянии и твердеющие в результате происходящих в них химических процессов или при охлаждении. Компаунды делятся на термореактивные, твердеющие в результате сшивания молекул, и термопластичные, твердеющие при охлаждении (битумы, а также полиамиды и другие термопластичные полимеры). Растворители, содержащиеся в лаках (как правило, от 50 до 70 %), при сушке улетучиваются, образуя поры и каналы, что снижает влаго- и нагревостойкость электроизоляционной конструкции. Многократные пропитки способствуют лучшему заполнению пустот лаковой основой. Однако даже при многократных пропитках не достигается такого заполнения пустот, как при пропитке компаундами. Во избежание пустот в изоляции, в которых возникает ионизация воздуха, обмотки высокого напряжения следует пропитывать компаундами. К компаундам предъявляются следующие требования:

– минимальное содержание летучих компонентов (не более 1 %);
– минимальная усадка при отверждении;
– низкая вязкость при пропитке, чтобы пропитка происходила достаточно глубоко;
– отсутствие вытекания термопластичного компаунда из обмоток при работе машины.

Кроме того, процесс пропитки и перехода компаунда в твердое состояние должен происходить быстро и при допустимых температурах (для каждого класса нагревостойкости изоляции); термореактивные компаунды при хранении и работе не должны резко повышать вязкость и загустевать (т. е. должны иметь достаточный срок службы) и вместе с тем не должны вытекать при отверждении. Как и прочие пропиточные составы, компаунды должны иметь высокие электроизоляционные свойства и быть достаточно влаго- и нагревостойкими. Для машин низкого напряжения используются компаунды КП (КП-18, КП-34, КП-101, КП-103, КП-50 и др.) на основе полиэфиракрилатов в сочетании со смолами, тунговым маслом или малеиновыми полиэфирами. Отверждение их происходит с помощью инициатора (перекиси бензоила). Различаясь вязкостью, сроком хранения, жесткостью полимера и в некоторой степени нагревостойкостью и электроизоляционными свойствами, они обладают одним общим свойством — способностью быстро отвердевать в толстом слое без выделения побочных продуктов, что делает их удобными для поточного механизированного производства (капельной пропитки). Наиболее часто применяемый компаунд КП-134 представляет собой композицию из полиэфиракрилата МГФ-1 (80 мас. ч.),смолы КО-916 (20 мас. ч.), перекиси бензоила (2 мас. ч.) и сиккатива 64Б (3 мас. ч.). Компаунды КП-101 и КП-103 — это композиции из метакрилированной эпоксидной смолы ЭД-16 (полупродукт ЭПМ) и полиэфиракрилатов МДФ-1 (КП-101) или МГФ-1 (КП-103). Они поставляются в готовом виде в комплекте с пастой перекиси бензоила на дибутилфталате (50 %), которая вводится в указанные лаки перед применением в количестве 3 %. Компаунд КП-50 является смесью полимеризационноспособных олигоэфиров. Высыхает при 125±50 °С в течение 10 мин. К компаундам, предназначенным для капельной пропитки, относится и Б-ИД-9 127 — композиция, содержащая олигоэфиримид и стирол. Инициатор отверждения вводится в него, как

и в КП, перед употреблением. Высыхает при 120±2 °С в течение 4 мин. Составы жесткие, и возможность их применения для пропитки обмоток из эмалированных проводов должна быть тщательно проверена. Высокая цементирующая способность составов типа КП обусловливает их применение для пропитки вращающихся обмоток, подверженных большим центробежным усилиям. Существенным недостатком этих компаундов является значительная вытекаемость и невысокая влагостойкость, в связи с чем их можно рекомендовать только для пропитки обмоток машин невлагостойкого исполнения. Компаунды КП-34, КП-101 и КП-103 более влагостойки и нагревостойки, чем КП-18, но все же их влагостойкость невысока (рис. 53). Изоляция выводных концов из проводов ПВЛО, ЛПРГС и ПРГ при воздействии на нее составов типа КП становится хрупкой и ломается, поэтому обмотки с выводными концами из этих проводов пропитывать, окуная в составы КП, нельзя; следует применять струйную пропитку, при которой состав на изоляцию выводных концов не попадает. Недопустим контакт компаундов типа КП с неизолированной медью, окислы которой являются ингибитором (замедлителем) сушки. Ингибирующее воздействие оказывает даже медный эмалированный провод, поэтому предподчтительнее пропитывать этими компаундами обмотки из алюминиевых проводов. Так как

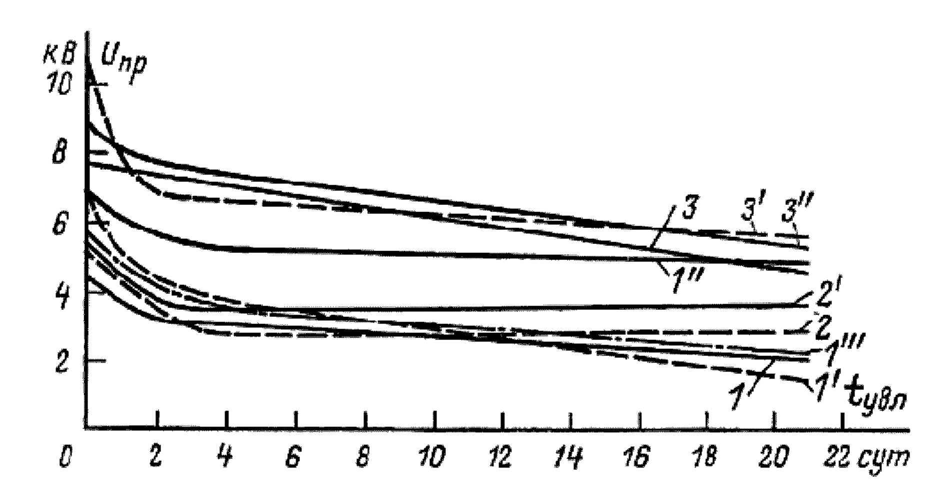


Рис. 53. Зависимость пробивного напряжения $U_{пр}$ витковой изоляции катушек из провода ПЭТ-155 от времени увлажнения $t_{увл}$:
1 — катушки не пропитаны; 1', 1'', 1''' — пропитаны составами КП-34, КО-916к, КП-103; 2 — не пропитаны; 2' — пропитаны КО-964Н; 3 — не пропитаны; 3' и 3'' — пропитаны БИД-91-27 и ПЭ-91-32

воздух также оказывает на них ингибирующее действие, влагостойкость обмотки, пропитанной компаундами типа КП, будет тем выше, чем больше отношение массы состава в обмотке к общей поверхности проводов. К недостаткам компаундов типа КП также относятся трудность ремонта и повторного использования узла в случае пробоя обмоток и значительное вытекание компаунда при сушке, вследствие чего в ряде случаев заполненность им обмотки не выше, чем при пропитке лаками, содержащими до 60 % растворителя. Компаунды КП-34, КП-101, КП-103, КП-50 и Б-ИД-9127 могут применяться для пропитки обмоток класса нагревостойкости F из провода ПСД. При использовании их для пропитки обмоток из эмалированных проводов ПЭТВ и ПЭТ-155 получается надежная система изоляции с нагревостойкостью класса В. Компаунды типа КП вызывают в процессе теплового старения значительные внутренние напряжения в эмалевых пленках проводов, особенно в «монолитных» системах, и несколько снижают сроки службы эмалевой изоляции. Из-за нарастания жесткости компаундов типа КП и их растрескивания в процессе теплового старения и из-за объемной усадки в процессе отверждения их не следует применять для пропитки обмоток больших габаритов. Для интенсификации пропитки обмоток крупных машин целесообразно применять метод вакуумной пропитки погружением с использованием составов без растворителей, имеющих высокую стабильность при температуре пропитки и достаточно высокую скорость желатинизации и отверждения (для минимального вытекания из обмотки в процессе термообработки). Для вакуумной пропитки методом погружения обмоток машин класса нагревостойкости Н разработаны составы без растворителя К-67 и к-67Ф, представляющие собой смесь олиговинилсилоксанов (К-67, в отличие от К-67Ф, содержит неорганический наполнитель). Для отверждения в них вводится перекись дикумила. Обмотки пропитывают составами, нагретыми до 70–80 °С, что снижает их вязкость, при таком нагреве «срок жизни» их 3 мес. Сушка обмоток после пропитки производится ступенчато: сначала при 130 °С, затем при 220 °С, но значительно дольше, чем при пропитке лаками КО-916к и КО-964. Пропитанные обмотки имеют хорошую наполненность компаундом, высокие влагостойкость и диэлектрические свойства. Состав К-67Ф более технологичен, чем к-67. Однако их

общим недостатком является склонность к растрескиванию в процессе теплового старения. Поэтому для обмоток машин повышенной надежности предпочтительнее использовать лаки КО-916к и КО-964, которые при вакуумной пропитке могут обеспечить и значительное сокращение цикла пропитки и сушки. Много лет для пропитки обмоток высокого напряжения широко применяли термопластичные битумные компаунды, представляющие собой сплав чистых битумов, имеющих определенную температуру размягчения, или сплав битума с растительным маслом и канифолью. Для компаундирования (пропитки битумом под давлением) используют обычно искусственные (нефтяные) битумы, получаемые окислением или в качестве остатка при перегонке и крекировании нефти и нефтепродуктов. Битумы при низких температурах хрупки и имеют раковистый излом; при нагреве они переходят в жидкое маловязкое состояние, а при охлаждении твердеют. Битумы легко растворяются в углеводородах, немаслостойки, нерастворимы в спирте и воде, негигроскопичны. Так как битумы термопластичны, то для пропитки вращающихся частей их не применяют. Чем выше температура размягчения битума, тем выше его электроизоляционные свойства и тем меньше он вытекает из обмотки. Однако применять битумы с температурой размягчения более 125 °C практически невозможно, т. к. они хрупки в холодном состоянии и имеют низкую пропитывающую способность. В основном битумы применяли для пропитки (компаундирования) обмоток высокого напряжения, а также для обмоток низкого напряжения влагостойкого исполнения. Для компаундирования, как правило, используют сплавы нефтебитумов — специального ухтинского марок В и Г и БН-V. При введении в битум льняного масла текучесть компаундов при высоких температурах снижается. Компаунды 225Д и 225Р представляют собой смесь битума, канифоли и обезвоженного льняного масла. Компаундом 225Р разбавляют компаунд 225Д с целью снижения температуры его размягчения. В последнее время все более широкое применение находят термореактивные компаунды, которые не имеют недостатков битумных (вытекание при повышенных температурах, необходимость производить пропитку при высоких температурах, «старящих» изоляцию). Термореактивные компаунды — синтетические материалы различного химического состава. Они значительно дороже битум-

ных, но пропитанная ими изоляция обладает существенно лучшими показателями. Ранее других были разработаны полиэфирные компаунды, являющиеся растворами насыщенной полиэфирной смолы (продукт поликонденсации гликолей или многоатомных спиртов с насыщенными двухосновными кислотами или ангидридами в жидком мономере винилового или аллилового типа) с добавками инициаторов и других компонентов. Чистые смолы дают усадку до 7 %, что создает механические напряжения в изделиях, добавка наполнителей снижает усадку и повышает теплопроводность компаунда. При нагревании жидкий полиэфирный компаунд твердеет без выделения побочных продуктов. Низкая вязкость этих компаундов при 20 °С позволяет применять их в качестве пропиточных. Компаунды КМГС изготовляют на основе метакриловых эфиров с добавлением пластификаторов. Компаунд МБК-1 образует жесткие полимеры, а МБК-2 и МБК-3 — эластичные; электрическая и механическая прочность компаунда МБК-1 выше, чем МБК-2 и МБК-3. Компаунды МБК обладают высокой пропитывающей способностью и при добавлении сиккативов полимеризуются при 70–100°С или при комнатной температуре. Компаунды инертны по отношению к меди. Затвердевая, они образуют влагостойкое вещество с рабочей температурой от –60 до 105 °С. Наиболее холодостоек компаунд МБК-3, наиболее нагревостоек — МБК-2. Длительность запекания компаундов в изделиях 10–18 ч при 70–75 °С и 6–8 ч при 110–120 °С. Компаунды применяют для герметизации погружных электрических машин.

Наибольшей электрической и механической прочностью и влагостойкостью обладают эпоксидные компаунды, переходящие в твердое неплавкое состояние в результате взаимодействия эпоксидных смол с отвердителями без выделения побочных продуктов и при незначительной усадке (не более 2 %). Они хорошо совмещаются с большинством электроизоляционных материалов, устойчивы к воздействию влаги и химически активным средам, имеют высокие механические и электроизоляционные свойства. Для повышения некоторых свойств в эпоксидные смолы вводят различные добавки. При введении неорганических наполнителей (в частности, маршалита) уменьшается усадка (менее 0,5 %), улучшаются теплопроводность и механические свойства, снижается стоимость изоляции. При введении пластификаторов увеличивается гибкость, но снижа-

ется максимальная рабочая температура изоляции. Активные разбавители уменьшают вязкость и обеспечивают заданную степень сшивания молекул. Эпоксидные смолы, в том числе и с добавками, отверждаются только с отвердителями, большинство которых требует активизации нагреванием. От природы отвердителей в большой степени зависят механические, электроизоляционные свойства и нагревостойкость конструкции. Компаунды, отверждающиеся при нагревании, имеют больший срок хранения и лучшие рабочие характеристики при более высоких температурах, чем компаунды холодного отверждения. Для пропитки обмоток применяют обычно компаунды без наполнителей, что обеспечивает лучшее заполнение изделия пропиточным составом. Пропитка обмоток из эмалированных проводов эпоксидными компаундами и эпоксидными лаками, как правило, приводит к резкому снижению сроков службы изоляции обмоток. Отечественной промышленностью выпускаются эпоксидно-диановые смолы, представляющие собой растворимые и плавкие реакционноспособные олигомерные продукты на основе эпихлоргидрина и дифенилпропана. В зависимости от физико-химических свойств смолы имеют марки ЭД-22, ЭД-20, ЭД-16, Э-14, ЭД-10 и ЭД-8 (цифры указывают содержание эпоксидных групп в процентах). Наименьшей вязкостью отличается смола ЭД-22; в сочетании с отвердителями она имеет максимальное время желатинизации, т. е. наиболее пригодна для пропитки и хранения. Свойства эпоксидных компаундов зависят от сочетания смол с различными отвердителями. В качестве отвердителей могут применяться ди- и полиамины, низкомолекулярные полиамиды, ди- и поликарбоновые кислоты и их ангидриды, фенолформальдегидные смолы и др. Наиболее широко в качестве отвердителей пропиточных компаундов распространены изометилтетрагидрофталевый (ИМТГФА) и метилтетрагидрофталевый (МТГФА) ангидриды. Однако компаунды с ангидридами не устойчивы к гидролизу, т. е. они непригодны для работы в условиях контакта с водяным паром или водой при повышенной температуре, т. к. при этом сравнительно быстро разрушаются. Влагостойкими и гидролитически стойкими являются эпоксидные компаунды, содержащие в качестве отвердителей ароматические амины. Для улучшения технологичности необходимо, чтобы была возможна их объемная дозировка, т. е. чтобы они были

жидкими при комнатной температуре. К таким ароиатическим аминам относится отвердитель АМ-14. Следует также учитывать, что компаунды с ароматическими аминами в отличие от содержащих ангидриды полимеризуются значительно быстрее и имеют лучшую совместимость с эмалевой изоляцией проводов. Примером эпоксидного компаунда на основе отвердителя АМ-14 и смолы ЭД-22 (ЭД-20) является компаунд ЭКД-14, пригодный для струйной пропитки обмоток электромашин. Его основные свойства следующие: вязкость по вискозиметру ВЗ-1 при 20 °С 60–180 с, продолжительность полимеризации в толстом слое при 160 °С 15 мин, цементирующая способность при 20 °С 350Н. Компаунд тропикостоек. Широко применяется для изоляции высокого напряжения «монолит» компаунд ПК-11, состоящий из смолы ЭД-22 (100 мас. ч.) и ангидридного отвердителя ИМТГФА (80 мас. ч.).

3.6. Покрывные лаки и эмали

Покрывные лаки предназначены преимущественно для создания защитного электроизоляционного покрытия на пропитанных обмотках, а также для покрытия металлов, различных электроизоляционных деталей из гетинакса, текстолита и других материалов. Они образуют механически прочную, гладкую, блестящую, влагостойкую пленку на поверхности твердой изоляции (часто — на поверхности предварительно пропитанной пористой изоляции). Такая пленка повышает напряжение поверхностного разряда и поверхностное сопротивление изоляции, создает защиту лакируемого изделия от действия влаги, растворителей и химически активных веществ, а также улучшает внешний вид изделия и затрудняет прилипание к нему загрязнений. Некоторые покрывные лаки (так называемые эмаль-лаки) наносят не на твердую изоляцию, а непосредственно на металл, образуя на его поверхности электроизоляционный слой (например, изоляция эмалированных проводов, изоляция листов электротехнической стали в расслоенных магнитопроводах электрических машин и аппаратов). В производстве проводов с эмалевой изоляцией наибольшее значение имеют синтетические клеящие лаки, на долю которых приходится около 90 % всех эмалированных проводов. Остальная часть изготавлива-

ется при помощи масляных лаков. Покрывные лаки должны иметь хорошие электрические характеристики, влагостойкость и нагревостойкость, оптимально быстро высыхать, проявлять хорошую адгезию к покрываемой поверхности и способность образовывать твердую и механически прочную пленку. Как и к пропиточным лакам, в зависимости от условий эксплуатации и назначения электротехнического оборудования, к покрывным лакам могут быть предъявлены и дополнительные требования, как, например, повышенная влаго- и термостойкость, стойкость к воздействию нефтяных масел и химически активных сред.

Покрывные лаки в основном состоят из лаковой основы и растворителя. Лаки, состоящие из естественной (шеллачные, копаловые и др.) или искусственной смолы и легко улетучивающихся растворителей, обычно отвердевают после удаления последних. Лаки, содержащие высыхающие масла и термореактивные синтетические смолы, отвердевают в результате удаления летучих и последующих физико-химических процессов в лаковой основе. В эти лаки обычно входят сиккативы (ускорители сушки). Пигментированные эмали в отличие от лаков имеют в своем составе неорганические пигменты. В некоторых эмалях высыхающие масла в процессе отвердевания взаимодействуют с пигментами, в результате чего образуется прочная и твердая эмалевая пленка. Лаки и эмали могут отвердевать как при воздушной сушке, так и при печной. Более высокими электроизоляционными и механическими свойствами обладают лаки и эмали печной сушки.Покрывные лаки и эмали должны создавать твердое блестящее покрытие, обладать хорошей адгезионной способностью, легко наноситься на обмотку и быстро сохнуть. При лакировании на поверхность обмотки наносится тонкий сплошной слой покрывного лака или эмали. Эмалью покрывают, таким образом, чтобы получалась равномерная плотная эластичная пленка, защищающая обмотку от заплесневения, пыли, воздействия влаги и других факторов окружающей среды. Обычно хорошее качество пленки получается при ее толщине 0,10–0,15 мм. Более толстый слой, полученный однократным нанесением, плохо просыхает, малоэластичен и слабо связан с обмоткой из-за оставшихся в глубине растворителей. Для создания высококачественного слоя пленки достаточной толщины производят многократное покрытие корпусной

изоляции обмоток лаком или эмалью, что делает пленку более влагостойкой, непроницаемой (рис. 54) и придает ей другие защитные свойства. Однако покрытие эмалями лобовых частей после пропитки обмоток из эмалированных проводов вряд ли целесообразно, т. к. может привести к снижению сроков службы системы при длительном тепловом старении, очевидно, вследствие большей жесткости пленки пропиточного лака с покрывной эмалью, чем пленки только пропиточного лака (табл. 30).

Из покрывных лаков и эмалей наиболее широкое применение получили следующие.

Масляно-битумный лак БТ-99 представляет собой раствор битума и масла в летучих растворителях (обычно в толуоле) с добавлением сиккатива. Лак воздушной сушки влагостоек, озоностоек,

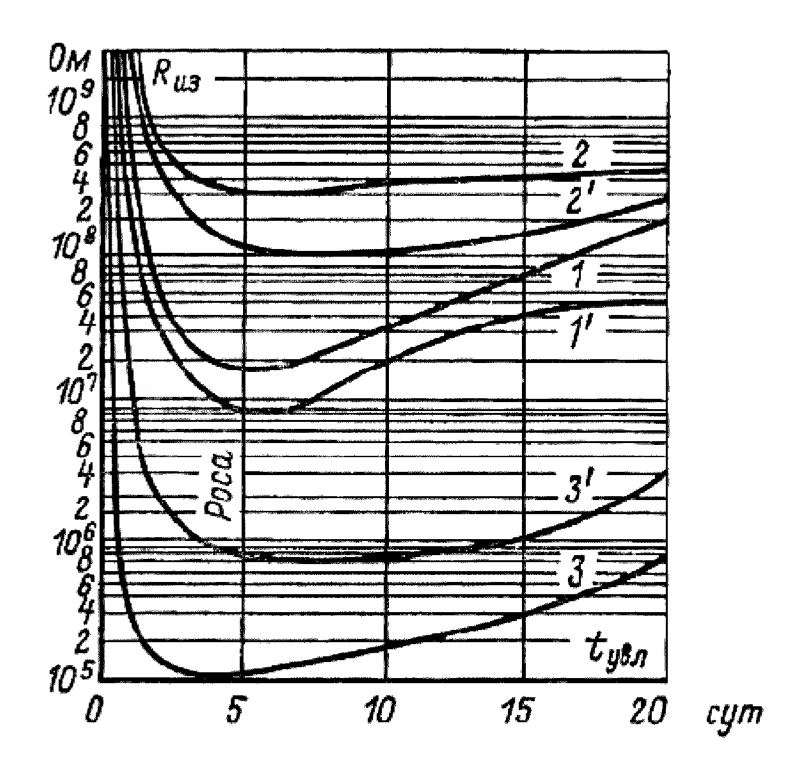


Рис. 54. Зависимость сопротивления изоляции $R_{из}$ макетов внутримашинных соединений от времени пребывания в атмосфере 98–100-процентный относительной влажности воздуха $t_{увл}$:
1, 1´ — макет изолирован двумя слоями стеклолакоткани ЛСЛ;
2, 2´ — то же, сверху покрыт эмалью ГФ-92ХС; 3, 3´ — то же, сверху покрыт тефтяной лентой; 1–3 — поверхностное электрическое сопротивление;
1´–3´ — объемное электрическое сопротивление

Таблица 30

Срок службы витковой изоляции из провода ПЭТВП, пропитанной лаком МЛ-92 с содержанием нелетучих 40 %

Количество пропиток	Покрытие лобовых частей после пропитки лодочек	Средний срок службы, ч, при температуре, °С		
		170	190	210
Непропитанные	Не покрытые эмалью	12000	4406	629
Одна пропитка	То же	12000	5280	1090
	Покрытие эмалью ГФ-92ХС	4992	1997	751
Две пропитки	Не покрытые эмалью Покрытые эмалью ГФ-92ХС	12336	4311	1101

обладает высокой адгезионной способностью, но немаслостоек. Применяется для покрытия пропитанных обмоток высокого и низкого напряжения.

Лаки полупроводящие покрывные Л-9000 и Л-9001 воздушной сушки представляют собой суспензию сажи в лаке БТ-99 и применяются для полупроводящих покрытий обмоток машин высокого напряжения с целью устранения коронирования. Удельное поверхностное сопротивление лака Л-9000 равно 1×10^{4}–1×10^{6} Ом, лака Л-9001 — 1×10^{9}–1×10^{11} Ом. Растворителем лака является толуол.

Эмаль ГФ-92ХС электроизоляционная дугостойкая сохнущая на воздухе — это смесь пигмента (литопона), глифталевого лака, растворителей (ксиленольная фракция, толуол и др.) и сиккатива. Обладает хорошей адгезионной способностью. Сохнет на воздухе в течение 12–24 ч, при 80–90 °С — за 1–2 ч. Пленка эмали маслостойка. Эмаль применяют для покрытия неподвижных обмоток электрических машин с изоляцией класса нагревостойкости А невлагостойкого исполнения. Эмаль выпускается двух цветов — серая и красная. Красная эмаль имеет более высокую термоэластичность, но менее влаго- и дугостойка, чем серая.

Эмаль ГФ-92ГС применяют для покрытия обмоток электрических машин с изоляцией класса нагревостойкости В, в том числе влагостойкого исполнения. Эмаль представляет собой смесь пигмента (литопона), глифталевого лака и растворителей (ксиленольная фракция, сольвент, скипидар и др.). Эмаль после сушки в тече-

ние 4–6 ч при 105–110 °С образует твердое электроизоляционное покрытие, масло — и влагостойкое, класса нагревостойкости В. Рекомендуется для электрических машин тропического исполнения. Растворителем эмали является ксилол.

Эпоксидная электроизоляционная эмаль ЭП-91 представляет собой суспензию пигментов в эпоксидном лаке с добавлением мочевиноформальдегидной смолы и растворителя (этилцеллозольва). Эмаль сохнет при повышенной температуре. Она предназначается для защитного покрытия лобовых частей обмоток тропического, усиленно влагостойкого и химически стойкого исполнений класса нагревостойкости F. Пленка эмали обладает очень высокой твердостью. После нанесения на обмотку эмаль должна сушиться 1 ч на воздухе, а затем при 190±5 °С в течение 2 ч. Допускается сушка при 150 °С, но не более продолжительная.

Эмаль КО-935 — теплостойкая покрывная электроизоляционная сохнущая при повышенной температуре, представляет собой суспензию пигментов в полиорганосилоксановом лаке КО-918. Для ускорения высыхания в эмаль введен сиккатив № 63. Эмаль КО-935 применяется для покрытия обмоток электрических машин с изоляцией класса нагревостойкости F и H, а также обмоток усиленно влагостойкого и тропически стойкого исполнений. Сушка эмали после покрытия производится 1–2 ч при температуре около 20 °С, затем 2–4 ч при 110–130 °С, а далее при 200–220 °С 8–10 ч для неподвижных обмоток и 12–14 — для вращающихся. Для лучшей адгезии эмали к пропитанной обмотке рекомендуется не полностью запекать лаковую пленку при сушке после последней пропитки (снижать температуру сушки или сокращать ее время). Допускается температура запекания эмали ниже 200 °С, но при этом снижается влагостойкость покрытия, поэтому для обеспечения требуемой влагостойкости эмаль КО-935 следует сушить при температуре не ниже 200 °С.

Более высокойтермоэластичностью обладает эмаль КО-936, но она недостаточно маслостойка. Окончательное запекание эмали КО-936 при температуре выше 200 °С необходимо. Режим запекания такой же, как для эмали КО-935, но время запекания при 200–220 °С должно быть увеличено на 2–4 ч.

Эмаль К-911 — теплостойкая покрывная электроизоляционная, сохнущая на воздухе, представляет собой суспензию пигментов

в полиорганоксилоксановом лаке КО-945 с растворителем (толуол). Перед употреблением в эмаль вводят отвердитель (полиэтиленполиамин — 2 % к сухому остатку). Применяют эмаль для устранения дефектов на пленках обмоток, покрытых эмалями КО-936 и КО-935, и для ремонтных целей. Выпускают двух цветов — розового и красно-коричневого.

Бакелитовые лаки немодифицированные (ЛБС-1, ЛБС-2, ЛБС-3 и ЛБС-4) и модифицированные (ФЛ-582) применяют для лакирования электроизоляционных деталей, а также для пропитки вращающихся узлов. Лаки обладают высокой адгезионной способностью, маслостойки. Их сушат при постепенном подъеме температуры от 60 до 150 °С. Растворитель лаков — этиловый спирт.

Большую влагостойкость обеспечивает покрытие модифицированным лаком ФЛ-582, представляющим собой раствор сплава фенолоформальдегидной смолы и плавленого янтаря с тунговым маслом в органических растворителях с добавлением парафина, ленолеата свинца и сиккатива. Растворителем лака является смесь ксилола и уайт-спирита.

Для покрытия листов электротехнической стали магнитопроводов могут применяться бакелитовые лаки (для изделий с нагревостойкостью классов А, Е и В), но лучшую лаковую пленку и нагревостойкость обеспечивает лак КФ-965, представляющий собой раствор смолы, состоящей из полимеризованных масел (смеси тунгового или ойтисикового с льняным) и резината кальция, в растворителях с добавлением сиккативов. Растворителями лака являются керосин или уайт-спирит. В машинах класса нагревостойкости Н применяется лак КО-916, растворителем которого является этилцеллозольв.

Клеящие лаки применяются в производстве слюдяных, фольгированных, пленочных и других композиционных материалов, а также для склеивания листов расслоенных магнитопроводов. С их помощью склеиваются между собой твердые электроизоляционные материалы. Общими требованиями, предъявляемыми к таким лакам, являются: высокая клеящая способность, хорошие и электрические и механические показатели, технологичность (стабильность пределов вязкости и содержания нелетучих веществ, температурных режимов и интервалов переработки лака. Клеящие лаки, ровно как и лаки покрывные, имеют ту же химическую природу, что и пропи-

тывающие, т. е. существуют алкидно-фенольные, битумно-масляные и др. виды клеящих лаков. Полиэфирноэпоксидный клеящий лак применяется для изготовления слюдопластовой ленты для электрической изоляции машин напряжением до 6,6 кВ и мощностью до 100 кВт. Кремнийорганический клеящий лак, модифицированный эпоксидной смолой, служит для цементации полюсных катушек электрических машин.

За последние годы освоено производство ряда новых марок электроизоляционных покрывных эмалей и лаков, которые находят все большее применение в электротехнической и радиоэлектронной промышленности.

Электроизоляционные покрывные эмали представляют собой суспензии пигментов и наполнителей в пленкообразующих лаках. В электротехнике их чаще всего применяют для получения покрытий, защищающих пропитанные цементирующими составами обмотки электрических машин и аппаратов от пыли, грязи, минерального масла, влаги, неблагоприятных климатических факторов, что позволяет повысить ресурс и надежность работы электрооборудования. Их также используют для получения электроизоляционных покрытий металлических и неметаллических деталей, узлов электрооборудования и элементов радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) — постоянных непроволочных резисторов, чип-резисторов, конденсаторов.

Электроизоляционные покрывные лаки представляют собой растворы пленкообразующих веществ в органических растворителях с добавлением функциональных добавок. Указанные лаки применяются в основном для получения влагозащитных покрытий печатных плат, электроизоляционных деталей из стеклотекстолита, для покрытия металлических поверхностей.

Электроизоляционные покрывные эмали и лаки выпускаются горячей и холодной (естественной) сушки.

Эмаль ЭП-992 – эмаль горячей (печной) сушки. Время высыхания покрытия якоря составляет не более 0,5 ч (режим печной сушки завода «Электросила»). После высыхания эмаль образует ровное, гладкое и полуглянцевое покрытие с высокими диэлектрическими и физико-механическими свойствами. Применяется для покрытия лобовых частей, секций катушек и других узлов и деталей электрических машин и аппаратов с изоляцией класса нагревостойкости F

по ГОСТ 8865, в том числе для вращающихся частей (якорей, роторов), и для окрашивания постоянных непроволочных резисторов. Например, завод «Электросила» ПАО «Силовые машины» (г. С.-Петербург) использует ЭП-992 зеленого цвета взамен эмали ЭП-91 для окрашивания якорей электрических машин постоянного тока напряжением до 1,2 кВ с изоляцией класса нагревостойкости F. Достаточно длительное время (с 1993 г.) ЭП-992 бледно-зеленого цвета применяется в ОАО «НПО «ЭРКОН» (г. Нижний Новгород) для окрашивания постоянных непроволочных резисторов общего назначения, прецизионных и высокочастотных с номинальной мощностью рассеяния 0,062–2,0 Вт. Покрытия эмалью обеспечивают работоспособность резистора под номинальной электрической нагрузкой при температуре окружающей среды +85 °С.

Эмаль ЭП-992П — двухкомпонентная эмаль горячей сушки, состоящая из полуфабриката эмали и ускорителя сушки. Применяются для окрашивания постоянных непроволочных резисторов, ЧИП-резисторов и других элементов РЭА. Эмаль марки ЭП-992П отличается повышенной стойкостью к покрывным лакам для печатных плат, термоциклированию (не менее 6 циклов при изменении температуры от –60 °С до +155 °С), а также к кратковременному воздействию расплава припоя (не менее 10 с при температуре плюс 260 °С). Образует матовое покрытие.

Эмаль ЭП-992Р — эмаль горячей сушки. Применяется, в основном, для окрашивания постоянных непроволочных резисторов, в том числе с цветной кодовой маркировкой. По сравнению с ЭП-992 имеет более высокое минеральное наполнение, отличается повышенной тиксотропностью, после высыхания образует ровное, гладкое и матовое покрытие. Использование эмали ЭП-992Р бледно-зеленого цвета в ОАО «Ресурс» (г. Богородицк) для окрашивания постоянных непроволочных резисторов взамен эмали ЭП-925 позволило снизить температуру сушки на 20 °С при высоком качестве покрытия.

Эмаль ЭП-992Э — эмаль горячей сушки. Предназначена для получения электроизоляционных покрытий, отличающихся повышенной эластичностью и стойкостью к термоциклированию. Использование в рецептуре эмали высокоэластичного пленкообразователя, а также оптимальное содержание пигментов и наполнителей позво-

ляет покрытиям выдерживать испытания термоциклированием (не менее 6 циклов при изменении температуры от –60 °С до +155 °С). Образует матовое покрытие.

Эмаль ЭП-992У двухкомпонентная эмаль горячей сушки, состоящая из полуфабриката эмали и ускорителя сушки. Отличается пониженным содержанием летучих органических растворителей, что обеспечивает получение толстослойных покрытий и высокую скорость их высыхания. Образует полуглянцевое покрытие.

Максимальная рабочая температура покрытий эмалями ЭП-992П, ЭП-992Р, ЭП-992Э, ЭП-992У составляет +155 °С.

При окрашивании узлов электрических машин и аппаратов эмаль ЭП-992 наносится, как правило, пневмораспылением с помощью ручного краскораспылителя. Перед нанесением эмали пневмораспылением ее предварительно разбавляют ксилолом, сольвентом или этилцеллозольвом до рабочей вязкости 20–30 с по ВЗ-246 с диаметром сопла 4 мм. Эмаль наносится в один или два слоя в зависимости от необходимой толщины покрытия. После нанесения каждого слоя и подсушки на воздухе в течение 15–30 мин покрытие изделия сушат конвективным способом в печи при температуре 160–170 °С в течение 0,5–1,0 ч (рекомендуемый режим).

Эмали ЭП-992, ЭП-992П, ЭП-992Р, ЭП-992Э, ЭП-992У наносятся на окрашиваемые постоянные непроволочные резисторы окунанием на механизированной линии окраски-сушки. Перед применением эмалей ЭП-992П, ЭП-992У в их полуфабрикаты вводят в необходимых количествах ускорители сушки, тщательно перемешивают и выдерживают в течение 24 ч, затем все марки эмалей разбавляют до рабочей вязкости 20–40 с (ВЗ-246, диаметр сопла 4 мм). Для разбавления эмалей ЭП-992, ЭП-992Р, ЭП-992Э используют ксилол, а для эмалей ЭП-992П, ЭП-992У — этилцеллозольв. Сушка покрытий производится терморадиационным способом по режиму:

- для эмалей ЭП-992, ЭП-992П, ЭП-992Р, ЭП-992Э при температуре 160–190 °С в течение 5–20 мин;
- для эмали ЭП-992У при температуре 165–205 °С в течение 45–120 с (каждый слой многослойного покрытия).

Эмали ЭП-992, ЭП-992П, ЭП-992Р, ЭП-992Э, ЭП-992У выпускаются красно-коричневого, кремового, бледно-зеленого, зеленого, голубого и черного цветов.

Эмаль ЭП-9111 — эмаль холодной (естественной) сушки. Выпускается ООО «Дельтапласт» по ТУ 2312-041-20939239-2011 взамен ранее разработанной эмали горячей (печной) сушки марки Эпималь-9111.

На заводе «Электросила» ПАО «Силовые машины» проводились сравнительные испытания эмалей ЭП-9111 и Эпималь-9111 по показателям входного контроля, технологическое опробование на реальных изделиях (шинах гидрогенератора), токсикологические испытания (анализ проб воздуха рабочей зоны).

Проведенные испытания подтвердили преимущества эмали ЭП-9111, к которым можно отнести:

– более короткое время высыхания покрытия на воздухе до степени 3;
– отсутствие необходимости в дополнительной печной сушке для получения требуемых диэлектрических и физико-механических показателей покрытия;
– значительно более высокую термоэластичность покрытия;
– пониженную токсичность из-за отсутствия в составе формальдегида и эпихлор-гидрина.

Эмаль ЭП-9111 применяется для покрытия обмоток и деталей электрических машин и аппаратов (в том числе вращающихся частей) с изоляцией класса нагревостойкости F по ГОСТ 8865. Отличается высокой скоростью высыхания покрытия на воздухе (2,5–3,0 ч до степени 3), высокими диэлектрическими свойствами и атмосферостойкостью покрытия. После высыхания эмаль образует гладкое полуглянцевое покрытие, что позволяет снизить пылегрязеудержание на окрашиваемой поверхности.

Область применения эмали ЭП-9111:

– электроизоляционные покрытия воздушной сушки обмоток, деталей и узлов крупногабаритных электрических машин (турбогенераторов, гидрогенераторов) при их изготовлении и монтаже рабочих узлов на объектах электроэнергетики;
– электроизоляционные покрытия неподвижных и вращающихся обмоток, деталей и узлов электрических машин, в том числе тяговых электродвигателей;
– электроизоляционные покрытия силовых цепей электрооборудования локомотивов и электропоездов, подверженных поверхностному перекрытию электрической дугой;

– электроизоляционные покрытия корпусов и деталей сухих и масляных трансформаторов, токоограничивающих реакторов, вакуумных выключателей, другого оборудования электроподстанций, работающего в условиях открытой промышленной атмосферы умеренно-холодного (УХЛ1) и холодного (ХЛ1) климата;
– электроизоляционные покрытия корпусов и деталей щитового оборудования электроподстанций.

В настоящее время потребителями эмали ЭП-9111 являются ремонтные предприятия РЖД, городского электротранспорта, участки по ремонту электрооборудования промышленных предприятий, предприятия-изготовители различного электротехнического оборудования, такие, наример, как ООО «Вакуумные технологии» (г. Рязань), где эмаль ЭП-9111 серого цвета применяется для окраски вакуумных дугогасительных камер высоковольтных выключателей.

Эмаль наносят на окрашиваемую поверхность, в основном, кистью и пневмораспылением. Перед нанесением эмали пневмораспылением ее предварительно разбавляют ксилолом или сольвентом до рабочей вязкости 20–30 с по ВЗ-246 с диаметром сопла 4 мм. При нанесении эмали кистью вязкость должна быть в пределах 60–100 с. Рекомендуются следующие варианты сушки покрытий эмалью ЭП-9111:

– холодная (естественная) — 24 ч на воздухе при температуре 15–35 °С;
– ускоренная горячая (печная) сушка покрытия при температурах 110–130 °С, время полного высыхания покрытия при указанных температурах составляет не более 0,5–1,0 ч.

Эмаль ЭП-9111 выпускается красно-коричневого, серого, бледно-зеленого, зеленого и розового цветов.

Эмаль ПЭ-9114 — эмаль горячей сушки. Применяется для окрашивания постоянных непроволочных резисторов, других радиодеталей с длительно допустимой рабочей температурой покрытия до +200 °С, а также для получения электроизоляционных покрытий обмоток и узлов электрических машин и аппаратов с изоляцией класса нагревостойкости Н по ГОСТ 8865. По области применения ПЭ-9114 сходна с эмалью ЭП-91, но отличается более высокими показателями нагревостойкости, адгезии и термоэластичности покрытия. К достоинствам эмали можно также отнести высокие зна-

чения показателей дугостойкости (не менее 8 с для эмали зеленого цвета) и трекингостойкости (группа «В»-50 капель электролита при напряжении 380 В). В ОАО «НПО «ЭРКОН» эмаль ПЭ-9114 зеленого и бледно-зеленого цветов применяется для получения электроизоляционных покрытий постоянных непроволочных резисторов типа С2-33 (нагревостойких), обеспечивающих работоспособность резисторов при температуре 200 °С в течение не менее 25 000 ч и выдерживающих испытания термоциклированием (не менее 6 циклов при изменении температуры от –60 до +200 °С).

На обмотки и узлы электрических машин эмаль наносится пневмораспылением или кистью, а окрашивание резисторов производится окунанием на механизированных линиях окраски-сушки. Перед использованием эмали ее доводят до рабочей вязкости добавлением этилцеллозольва. Рекомендуются следующие режимы сушки покрытий эмалью ПЭ-9114:

– изделия электротехники с печным способом сушки — 0,5–1,0 ч на воздухе при температуре 15–35 °С, затем 3 ч при температуре 180–190 °С;
– резисторы с терморадиационным способом сушки — 7–25 мин при температуре 170–210 °С.

Эмаль ПЭ-9114 выпускается красно-коричневого, серого, бледно-зеленого, зеленого и розового цветов.

Эмаль ЭФ-9155 — эмаль холодной (естественной) сушки. Предназначена для получения электроизоляционных покрытий обмоток, узлов и деталей электрических машин и аппаратов (в том числе вращающихся частей) с изоляцией класса нагревостойкости F по ГОСТ 8865. По области применения и свойствам схожа с эмалью ЭП-9111. Отличается от ЭП-9111 летучей частью, состоящей, в основном, из малотоксичного уайт-спирита. Эмаль образует полуглянцевое покрытие, высыхающее на воздухе до степени 3 в течение не более 4 ч (полное высыхание — не более 24 ч). Атмосферостойкость эмали ЭФ-9155 ниже по сравнению с ЭП-9111, поэтому ее не рекомендуется применять для электроизоляционных покрытий оборудования и изделий, которые эксплуатируются в открытой атмосфере (условия эксплуатации У1, ХЛ1, УХЛ1, Т1).

Эмаль ЭФ-9155 выпускается красно-коричневого, серого, бледно-зеленого, зеленого и розового цветов.

Лак ЭФ-9179 применяется для влагозащиты радиодеталей и блоков электрорадиоаппаратуры, изготовленных с применением печатного монтажа, для получения электроизоляционных покрытий различных поверхностей. Время высыхания покрытия лака до степени 3 при температуре 60 °С не превышает 0,5 ч, время полного высыхания — 2 ч. ЭФ-9179 рекомендуется использовать в качестве замены лака ЭП-9114. Основными преимуществами лака ЭФ-9179 по сравнению с ЭП-9114 являются его однокомпонентность и более высокая скорость высыхания покрытия.

Лак ЭП-9202 ГС применяется для защиты деталей и узлов электрорадиоаппаратуры, работающих в условиях повышенной влажности, температуры, действия агрессивных сред. Время полного высыхания покрытия лака при температуре 150 °С составляет не более 0,5 ч. ЭП-9202 ГС рекомендуется в качестве замены лака ЭП-730. Основным преимуществом лака ЭП-9202 ГС по сравнению с ЭП-730 является его однокомпонентность и более высокая скорость высыхания покрытия.

3.7. Совместимость эмалированных проводов с пропиточными составами и покрывными эмалями

Под совместимостью понимается свойство системы из различных ЭИМ совместно работать в определенных условиях эксплуатации и в определенных конструкциях без взаимного или одностороннего отрицательного воздействия, снижающего качество конструкции в целом.

При выборе материалов для обмоток электрических машин очень важно оценить совместимость изоляции обмоточного провода и пропиточного состава. Разрушение изоляции провода, в частности эмалевой, может произойти на стадии пропитки, термообработки и длительного нагрева. Проанализируем возможные изменения. В процессе пропитки и сушки обмотки эмаль провода по всей поверхности контактирует с пропиточным материалом, находящимся в жидком состоянии, при повышенной температуре. Вследствие взаимодействия растворителей и реакционноспособных компонентов пропиточных материалов могут происходить размягчение и набухание эмали. После термообработки такой системы пробивное напря-

жение, нагревостойкость и влагостойкость ее могут оказаться ниже, чем у системы непропитанной. Такое же изменение свойств может произойти при длительном нагреве изоляции в процессе эксплуатации в результате растрескивания и расслоения системы пропиточный состав — эмаль.

Лакокрасочные материалы наносятся на защищаемую поверхность, как правило, по многослойным системам, которые могут состоять из грунтовок, шпатлевок, эмалей различного назначения. При этом лакокрасочные материалы, входящие в систему, могут быть разнородными не только по пигментной части, но и по пленкообразующей основе, но они должны быть совместимы друг с другом. Стандарт ИСО 12944-5 дает определение совместимости ЛКМ как способность двух или более ЛКМ быть использованными в системе покрытий без выявления нежелательных эффектов. Использование материалов с несовместимыми связующими и растворителями, которые не обеспечивают необходимой межслойной адгезии или качественного равномерного послойного покрытия, приводят к необходимости удаления некачественного покрытия и повторному выполнению подготовительных и окрасочных работ.

При составлении систем покрытий лучше всего использовать материалы с одним типом связующего. Особенно это касается материалов химического отверждения (эпоксидных и полиуретановых). Для обеспечения необходимой межслойной адгезии при нанесении этих материалов по ним необходимо очень точно выполнять рекомендации по времени межслойной сушки. В состав эпоксидов и полиуретанов входят очень активные растворители (ксилол, ацетон, циклогексанон), поэтому эти материалы нельзя наносить по обратимым покрытиям физического отверждения (хлоркаучуковым, виниловым, сополимерно-винилхлоридным, нитроцеллюлозным и т. п.), т. к. может произойти растворение обратимых покрытий и образование дефектов. При нанесении эпоксидных или полиуретановых покрытий на материалы, отверждающиеся кислородом воздухе (алкидные, масляные), может произойти набухание и подрастворение этих покрытий и отслоение всего покрытия от металла.

Полиуретановые эмали можно наносить только по полиуретановым, поливинилбутиральным или эпоксидным грунтовкам и эмалям, соблюдая требования по условиям межслойной сушки для обе-

спечения межслойной адгезии. Эпоксидные эмали можно наносить только по эпоксидным, поливинилбутиральным, цинксиликатным и этилсиликатным грунтовкам и эмалям.

Кремнийорганические и силикатные лакокрасочные материалы не рекомендуется наносить ни по каким другим видам лакокрасочных материалов, т. к. большинство из них является материалами термического отверждения.

Алкидные и масляные эмали можно наносить практически по всем лакокрасочным материалам физического отверждения, кроме битумных и пековых. В случае применения алкидных и масляных эмалей по покрытиям, содержащим битумы и пеки, возможна миграция последних в верхние слои и изменение их цвета.

Виниловые, сополимерно-винилхлоридные и хлоркаучуковые материалы можно наносить по поливинилбутиральным, акриловым, эпоксиэфирным, цинксиликатным и эпоксидным материалам.

При выборе лакокрасочных материалов для ремонта покрытий после эксплуатации в первую очередь необходимо уточнить лакокрасочные материалы, использовавшиеся при предыдущем окрашивании.

При ремонте лучше использовать те же лакокрасочные материалы, что и при предыдущем окрашивании или аналогичные им (на том же связующем).

Для исключения ошибок лучше всего пользоваться экспериментально проверенными рекомендациями, приведенными в технологической инструкции или других документах на данный материал.

Одним из узловых вопросов при конструировании изоляции машины с обмотками из эмалированных проводов является выбор пропиточного состава. Пропиточный состав должен повысить электроизоляционные свойства витковой изоляции и сцементировать витки, не вызывая при пропитке и сушке необратимых ухудшений в эмалевой пленке или ускорения ее старения в процессе эксплуатации. Многочисленными исследованиями установлено, что использование эмалированных проводов при неправильно подобранном пропиточном составе, например эпоксидном, может резко снизить срок службы обмотки. Поэтому для каждой марки провода должны применяться соответствующие пропиточные составы. Для обмоток из проводов с волокнистой изоляцией выбор пропиточных составов

решается однозначно: чем более нагревостоек пропиточный лак, тем более нагревостойкой будет система изоляции. Для этих проводов не представляет опасности и высокая цементирующая способность пропиточного лака. В случае применения эмалированных проводов нагревостойкость системы изоляции зависит от выбора прпиточного состава не в меньшей степени, чем от нагревостойкости самого провода. В связи с тем, что между пленками эмалированного провода и пропиточного состава происходят сложные химические и физические взаимодействия, нагревостойкость этих пропиточных составов не всегда определяет нагревостойкость системы изоляции. Большую роль играет цементирующая способность пропиточного состава, особенно если она значительно возрастает в процессе теплового старения, поэтому пропиточный состав для обмоток из эмалированных проводов может быть выбран только после проведения комплекса длительных исследований. Для выбора правильных сочетаний эмалированных проводов с пропиточными составами необходимо всесторонне изучать свойства тех и других при их взаимодействии в процессе пропитки, сушки, а также при их взаимодействии в процессе теплового старения. Испытания эмалированных проводов с напряженной эмалевой пленкой (относительное удлинение 10 %, что типично для любой обмотки) показали, что вода воздействует на эмалевую изоляцию проводов активнее, чем толуол. Жесткие пропиточные составы в процессе теплового старения обмоток создают значительные напряжения в эмалевых пленках провода и снижают их адгезию к меди, что значительно сокращает срок службы системы эмалированный провод — пропиточный состав. Поэтому, несмотря на то, что лак ПЭ-933 более нагревостоек, чем эластичный лак МГМ-8, сроки службы обмоток из проводов марки ПЭТВ, пропитанных этими лаками, получаются одинаковыми. Цементирующая способность лака МГМ-8 в исходном состоянии и в процессе теплового старения ниже, чем лака ПЭ-933. При вырывании центрального проводника из пучка, пропитанного лаком МГМ-8, разрушение происходит в слое пропиточного лака, а в пучках, пропитанных лаком ПЭ-933, происходит отрыв эмалевой пленки от меди провода. Цементирующая способность лака ПЭ-933 превышает адгезию эмалевой пленки меди. Ряд исследований показал, что пропиточные составы, хорошо совмещающиеся с нагревостойкими эма-

лированными проводами, например КО-916к и КО-964Н, обычно имеют невысокую адгезию к эмалевым пленкам проводов и не вызывают резкого повышения внутренних напряжений при воздействии повышенных температур и значительного снижения адгезии эмалевых пленок к меди провода. Обычно такие составы имеют высокую термоэластичность. В процессе теплового старения разрушение систем изоляции может происходить не только вследствие химического старения каждого из компонентов и побочных химических воздействий, когда продукты разложения одного компонента разрушают другой, но и в результате физических взаимодействий, возникающих при химических превращениях в компонентах системы изоляции. В системе нагревостойкий эмалированный провод — пропиточный состав могут возникнуть значительные внутренние напряжения, приводящие к снижению адгезии эмалевой пленки к меди провода и часто превосходящие механическую прочность эмалевой пленки, т. е. вызывающие образование дефектов. Поэтому важным показателем пропиточных составов является отсутствие резкой зависимости внутренних напряжений от времени теплового старения как отдельно в их пленках, так и в системах эмалированный провод — пропиточный состав. Несмотря на то, что в исходном состоянии внутренние напряжения в пленках лака КО-916к значительно выше, чем лака ПЭ-933, в процессе теплового старения они повышаются значительно меньше, чем у лака ПЭ-933 (табл. 31).

Как уже упоминалось, большое значение имеет адгезия эмалевого лака к меди провода и пленки пропиточного состава к эмалевой пленки провода. Чем ниже адгезия пленки пропиточного состава к пленке эмалированного провода и выше адгезия эмалевой пленки к меди провода, тем медленнее происходит снижение сил адгезии эмалевой пленки к меди пропитанной обмотки в процессе теплового старения и выше нагревостойкость системы изоляции (табл. 32–34 и рис. 55).

При определении адгезии системы медь — эмалевая пленка провода — пленка пропиточного состава до старения разрушение происходит на границе пленка пропиточного состава — эмалевая пленка провода (как и при испытании на цементирующую способность), после старения соотношение адгезионной прочности изменяется. К примеру, в сочетаниях проводов ПЭТ-155 с пропиточными соста-

Таблица 31

Внутренние напряжения в пленках эмалевых и пропиточных лаков и комбинированных системах

Эмалевый лак (провод)	Приточный лак	Напряжение в исходном состоянии, МПа	Темпе-ратура старения, °С	Напряжения при старе-нии, МПа	Продолжи-тельность ста-рения до начала разрушения, сут
ПЭ-955 (ПЭТ-155)	Нет	13,7	220	22,5	50
ПЭ-955 (ПЭТ-155)	ПЭ-933	5,3	220	23,4	5
	КО-916к	9,5	220	15,4	70
	МЛ-92	7,2	220	26,9	3
ПЭ-939 (ПЭТВ)	Нет	10,3	220	14,2	20
ПЭ-939 (ПЭТВ)	ПЭ-933	3,3	200	24,4	10
	КО-916к	9,0	200	14,6	100
	МЛ-92	3,5	200	12,7	5
ПЭ-943 (ПЭТВ)	Нет	9,2	180	14,0	10
			220	19,5	3
ПЭ-943 (ПЭТВ)	ПЭ-933	1,1	160	18,0	80
			180	23,5	20
			200	30,0	70
			220	37,2	10
	КО-916к	6,6	200	14,4	80
			220	24,0	70
	КО-964н	0,2	180	2,5	70
			200	4,0	70
	МЛ-92	4,6	160	16,0	15
			200	9,0	3

вами при тепловом старении очень быстро и резко снижается адгезия к меди провода пропитанной системы эмалевая пленка ПЭ-955 — основа лака МЛ-92 и менее резко системы пленка ПЭ-955 — основа ПЭ-933; у обмоток, пропитанных лаком КО-916к, при последующем старении в течение 60 сут при 180 °С обеспечивается высокая адгезия к меди провода системы эмалевый провод — лак; при пропитке лаком КО-964Н и последующем старении в течение 100 сут при 180 °С разрушение происходит на границе эмаль провода — плен-

Таблица 32

Адгезионная прочность в системах эмалированный провод — пропиточный лак и смачиваемость эмалированного провода ПЭТ-155 лаками

Лак	Адгезионная прочность, МПа	Высота капиллярного поднятия, мм	Время достижения равновесного значения высоты, с (при 21 °С)
МЛ-92	33,7	19,45	40
ПЭ-933	23,8	16,10	350-400
КО-916к	17,2	21,05	60
КО-964Н	10,8	—	—
ПЭ-955	30,5	—	—

Таблица 33

Центрирующая способность лаков на проводе ПЭТ-155 диаметром 1,62 мм в холодном и нагретом состояниях

Лак	Усиление вырыва центрального провода в исходном состоянии, Н, при температуре, °С		Время начала отрыва эмалевых пленок от меди, сут, при температуре старения, °С						Усилие вырыва центрального провода в момент начального отрыва эмалевой пленки от меди, Н, при температуре старения, °С					
			170		190		210		170		190		210	
			и температуре испытания, °С											
	20	155	20	155	20	155	20	155	20	155	20	155	20	155
ПЭ-933	480	452	28	28	10	10	4	4	368	332	392	386	383	362
КО-916к	416	385	84	84	30	30	12	12	419	370	456	420	413	398
КО-964Н	290	64	196	196	60	70	8	24	277	280	219	232	378	234
МЛ-92	431	177	10	10	8	8	—	—	255	243	466	183	—	—

ка пропиточного лака. Этот лак обеспечивает наибольшую адгезию пропитанной системы к меди проводов всех типов в процессе теплового старения. Как видно из всех приведенных данных, для эмалированных проводов ПЭФ-155 и ПЭТ-155 оптимальными являются пропиточные лаки КО-916к и КО-964Н. Характерная особенность этих лаков — сочетание хорошо смачивающих свойств с невысокой адгезией к пленке эмалевого лака. Помимо указанного, большую роль при применении жестких пропиточных составов, особенно без растворителей, играет степень заполнения обмоток лаком. При вы-

Таблица 34

Совместимость эмалированных проводов с пропиточными составами (в скрутках)

Провод	$ТИ_{20000}$, °С, при пропитке составами							
	не пропитан	МЛ-92	ПЭ-933	ПЭ-993	КП-34	КП-103	КО-916к	Эпоксидными смолами
ПЭТВ-943	148	150	—	—	—	—	—	115–124
ПЭТВ-939	152	149	154	151	147	151	173	109–121
ПЭТВФ-35	167	135	132	—	—	—	—	—
ПЭТВР RL-603	158	93	143	—	—	—	—	—
ПЭТ-155	188	145	160	—	165	163	182	112–124

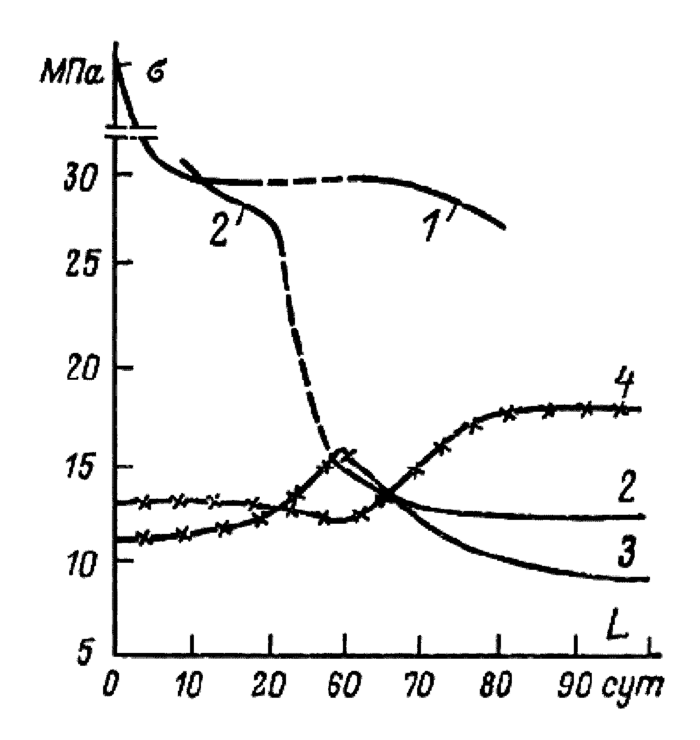


Рис. 55. Зависимость адгезионной прочности σ в системе эмалированный провод ПЭТ-155 — пропиточный состав от продолжительности старения L при 180 °С: 1 — провод ПЭТ-155 непропитанный; 2 — ПЭТ-155+ПЭ-933; 3 — ПЭТ-155+КО-916к; 4 — ПЭТ-155+КО-916Н; «–» — разрушение по границе медь — эмалевая пленка; «x» — разрушение по границе пропиточный лак — эмалевая пленка

сокой степени заполнения, так называемой «монолитной» системе, возникают большие внутренние напряжения, при неполном заполнении, так называемой «сотовой» системе, внутренние напряжения меньше и повреждение эмалевой пленки пропиточным составом наступает позже. При применении эмалированных проводов и синтетических пропиточных лаков использование покрывных эмалей не эффективно. Они были необходимы для повышения твердости и маслостойкости поверхностей при пропитке обмоток из проводов с волокнистой изоляцией масляно-битумными лаками. Нанесение слоя покрывной эмали на пропитанную лаком обмотку из эмалированных проводов вызывает рост внутренних напряжений в системе, может привести к снижению срока службы обмотки и не дает существенного повышения других параметров, в том числе твердости. Нагревостойкость проводов с полиэфирной изоляцией, например марки ПЭТВ, снижается при пропитке всеми испытанными органическими лаками и повышается при пропитке кремнийорганическими лаками. Применение водоэмульсионных лаков для пропитки обмоток из проводов с полиэфирной изоляцией недопустимо, т. к. приводит к резкому снижению срока их службы. При пропитке проводов ПЭТВ лаками МЛ-92, МГМ-8, ПЭ-933 и компаундом КП-34 надежно обеспечивается класс нагревостойкости В. Покрытие эмалью ГФ-92ГС обмоток из провода ПЭТВ, пропитанных лаком МГМ-8 и компаундом КП-34, может снизить их нагревостойкость. Применение для пропитки проводов ПЭТВ эпоксидных компаундов недопустимо, т. к. резко снижает их нагревостойкость. Это относится как к специальным пропиточным компаундам на основе смолы «Аралдит CY-236» и отвердителя HY-984 и смолы «Аралдит CY-209» и отвердителя HY-984 фирмы CIBA (Швейцария), так и к компаунду на основе эпоксидной смолы MER-200 с отвердителем МТГФА. Провода ПЭТ-155 с полиэфиримидной изоляцией по нагревостойкости относятся к классу F, но при применении для пропитки обмоток из этого провода лака МГМ-8 нагревостойкость снижается до класса В; при пропитке лаком ПЭ-933 она находится на нижнем пределе класса F; при использовании в качестве дополнительного покрытия жесткой эмали ЭП-91 — снижается до класса В, а жесткого грунта ЭП-09т — до класса А. К еще более резкому снижению нагревостойкости приводит пропитка проводов ПЭТ-155 эпоксид-

ными составами. Использование для пропитки обмоток из проводов ПЭТ-155 кремнийорганических лаков КО-916к и КО-964Н заметно повышает нагревостойкость проводов, обеспечивая с запасом класс нагревостойкости системы изоляции F. Резкое влияние органических пропиточных лаков на нагнревостойкость эмалированных проводов ПЭТ-155 иллюстрируется данными (рис. 56), на котором приведены результаты определения пробивного напряжения витковой изоляции катушек до и после старения при 170 °С. Катушки имеют два ряда проводников, между которыми и определяется пробивное напряжение. После старения пробивное напряжение катушек, пропитанных органическими лаками, резко снижается по сравнению с непропитанными (табл. 35). При пропитке кремнийорганическими лаками КО-964Н и КО-916к этого явления не наблюдается. Основными причинами снижения пробивного напряжения являются растрескивание пропиточных составов, снижение адгезии и отслоение эмали от меди провода и в дальнейшем трещины в эмали.

Как показали проведенные исследования микроструктуры, такие составы, как ЭКД-14 и КП-50, отслаивают эмалевую пленку от проволоки уже в процессе сушки после пропитки макетов обмотки, чего не наблюдается при пропитке состава Б-ИД-9127, КО-964Н и КО-

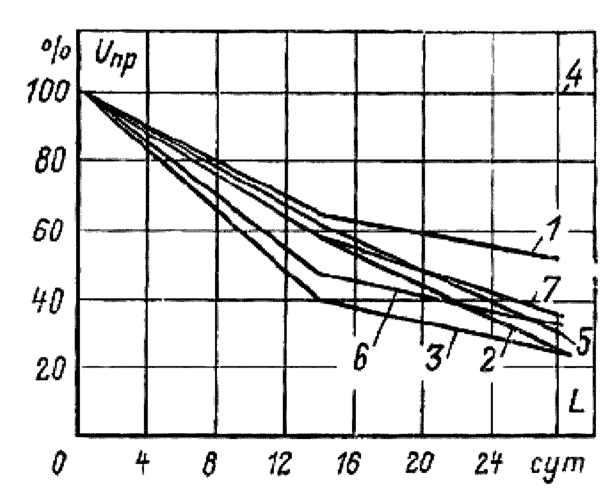


Рис. 56. Снижение пробивного напряжения $U_{пр}$ витковой изоляции катушек из провода ПЭТ-155 после воздействия в течение времени L температуры 170 °С: 1 — непропитанные катушки; катушки пропитанные составами: 2 — КП-34; 3 — КП-103; 4 — КО-964Н; 5 — ЭКД-14; 6 — БИД-91-27; 7 — ПЭ-91-32

Таблица 35

Изменение электрической прочности витковой изоляции после 28 сут старения катушек

Провод	Лак	Пробивное напряжение % (в исходном состоянии —100 %), после старения при температуре, °С		
		170	190	210
ПЭТ-155	ПЭ-933	13,3	—	—
	КП-34	36,6	—	—
	КП-103	44,4	—	—
	ПЭ-91-32	28,7	23,0	20,7
	БИД-91-27	36,6	14,6	14,0
	ЭКД-14	25,7	12,8	1,8
	КП-50	45,5	36,4	3,3
	КО-964Н	87,1	—	—
	КО-916к	77,1	41,0	—
ПЭФ-155	ПЭ-933	56,1	42,1	8,8
	МЛ-92	40,5	25,0	10,7
	ПЭ-91-32	28,4	23,9	4,9
	БИД-91-27	58,0	50,0	6,0
	ЭКД-14	66,2	44,6	7,7
	КО-964Н	74,0	74,0	26,0
	КО-916к	97,6	95,3	65,2
ПЭТ-200	КО-916к	56,0	35,4	24,2
ПЭД-180	КО-916к	140,9	147,3	84,9

916к. Плохое заполнение составом обмотки может в процессе старения даже при 170°С приводить к текучести, набуханию эмалевой пленки в месте пустот (как, например, при сочетании проводов марок ПЭТ-200, ПЭФ-155 и ПЭТМ-155 с лаком КО-964Н). При более высоких температурах (210 °С) применение жестких составов (особенно КП-50) приводит к очень быстрому (уже через 24 ч) отслоению и растрескиванию эмалевых пленок. Однако эти первоначальные процессы не полностью характеризуют нагревостойкость пропитанных обмоток из эмалированных проводов, т. к. дальнейшие процессы старения эмалевых пленок, выводящие из строя обмотку, определяются сложными химическими и физическими взаимодействиями, и только после очень длительного старения при 170 °С об-

мотка приходит в годность. Поэтому корреляция между степенью снижения пробивного напряжения в течение 672 ч старения при 170 и 150 °С и нагревостойкостью системы изоляции не всегда наблюдается. Несмотря на то, что после непродолжительного старения при 170 и 150 °С катушек, пропитанных составами КП-34, КП-103, ПЭ-933 и ПЭ-993, происходит значительное снижение пробивного напряжения и значения его становятся одного порядка, выход из строя обмоток из провода ПЭТ-155 при 170 °С начинается через 2352 ч при пропитке лаком ПЭ-993 и через 5712–9072 ч при пропитке остальными перечисленными лаками (рис. 56). Средний срок службы витковой изоляции статоров при 170 °С составляет 4874 ч при пропитке лаком ПЭ-993 и 7728 ч и 9502 ч соответственно при пропитке КП-34 и ПЭ-933. В случае применения кремнийорганических лаков КО-916к, особенно КО-964Н, системы изоляции с проводом ПЭТ-155 относятся к классу нагревостойкости F с запасом, а при использовании составов ПЭ-91-32, ПЭ-933, КП-34 и КП-103 с недостаточной степенью надежности обеспечивается класс нагревостойкости F. Покрытие обмоток, пропитанных лаком КО-916к, эмалью КО-935, немного снижает срок их службы, а покрытие жесткой эмалью ЭП-91 резко уменьшает его. Выпускаемые промышленностью покрывные эмали все без исключения могут снизить нагревостойкость пропитанных обмоток из эмалированных проводов, и поэтому применять их для обмоток из эмалированных проводов можно только после тщательных, всесторонних исследований системы изоляции.

3.8. Лакоткани и стеклолакоткани

Лакотканью называется гибкий электроизоляционный материал, представляющий собой ткань, пропитанную электроизоляционным лаком. Ткань обеспечивает значительную механическую прочность, а лаковая пленка — электрическую прочность материала. В машинах с изоляцией класса нагревостойкости А в качестве основной изоляции обмоток широко применяют лакоткани и стеклолакоткани, гибкие материалы, представляющие собой ткани на основе хлопчатобумажных, шелковых, капроновых или стеклянных волокон, пропитанных различными лаками. В качестве вспомогательной

изоляции соответствующие марки стеклолакотканей применяют в электрических машинах с изоляцией классов нагревостойкости Е, В, F и Н. При пропитке волокнистых материалов значительно повышается их механическая прочность и улучшаются электроизоляционные свойства вследствие заполнения пор и капилляров электроизоляционными составами, отчего замедляются процессы поглощения влаги и проникновения кислорода воздуха в микро- и макропоры. Хлопчатобумажные и шелковые лакоткани всех марок относятся к классу нагревостойкости А. Их не следует использовать в машинах влагостойкого, тропического и химостойкого исполнений. Светлые лакоткани и лакошелк (марок ЛХМ, ЛКМ, ЛШМ), пропитанные масляными лаками, стойки к воздействию масел и бензина, но менее влагостойки и имеют более низкие диэлектрические свойства, чем черные (марки ЛХБ). Лакошелк (на натуральном шелке и капроне) более эластичен, тонок, имеет более высокую электрическую прочность, чем хлопчатобумажные лакоткани. Лакоткани и лакошелк ранее широко применялись в качестве основной изоляции паза, лобовых частей катушек, внутримашинных соединений обмоток с нагревостойкостью класса А. Нагревостойкость стеклолакотканей определяется свойствами их лакового покрытия. Практически все стеклолакоткани невлагостойки вследствие поглощения влаги поверхностью стеклянных волокон, особенно замасливателем (рис. 57). Исследования технологических свойств всех выпускаемых промышленностью лако- и стеклолакотканей показали, что наиболее технологичны стеклолакоткани ЛСЛ и ЛСЭ, пропитанные каучуковыми лаками, которые применяют в качестве основной изоляции. Стеклолакоткань латексная ЛСЛ лучше сохраняет свою эластичность в процессе хранения (рис. 58), имеет большую механическую прочность и несколько большую влаго- и нагревостойкость, чем эскапоновая ЛСЭ. Эти стеклолакоткани стойки к химически активным средам, но немаслостойки и не стойки к воздействию ряда растворителей. В зависимости от конструкции изоляции и функций они могут использоваться в машинах с изоляцией классов А и Е, т. к. их нагревостойкость выше, чем хлопчатобумажных и шелковых лакотканей (табл. 36, 37).

При применении эскапоновой, а особенно латексной стеклолакоткани вместо лакотканей марок ЛХС и ЛХЧ значительно повы-

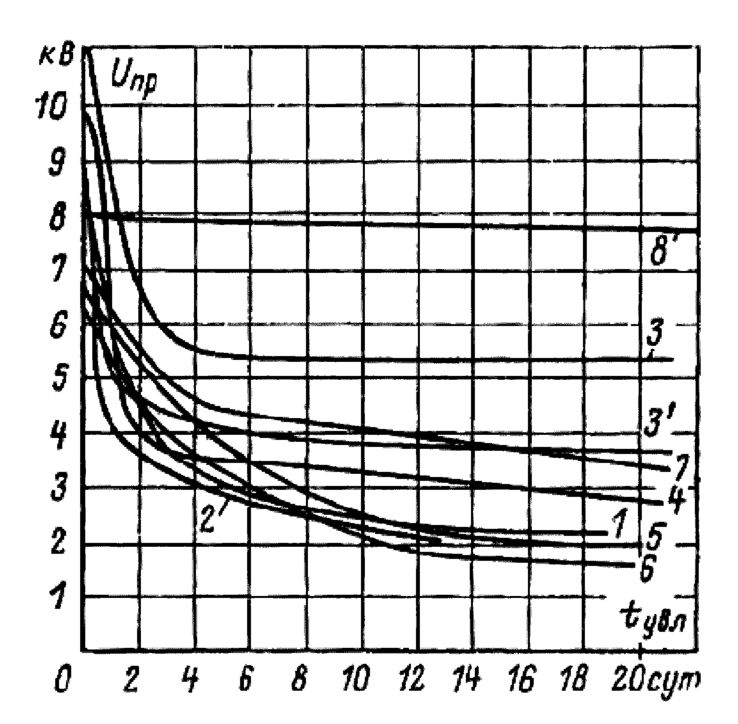


Рис. 57. Зависимость среднего пробивного напряжения $U_{пр}$ материалов от времени пребывания в атмосфере 98-процентной относительной влажности воздуха $t_{увл}$: 1 — лакоткань ЛХМ толщиной 0,2 мм; 2 — стеклолакоткань ЛСЭ, 0,2 мм; 3 — ЛСЛ, 0,2 мм; 3′ — ЛСЛ, 0,17 мм; 4 — ЛСБ, 0,2 мм; 5 — ЛСП, 0,15 мм; 6 — лакоткань ЛХБ, 0,2 мм; 7 — стеклолакоткань ЛСК, 0,15 мм; 8 — гибкий миканит ГФК-ТТ, 0,35 мм

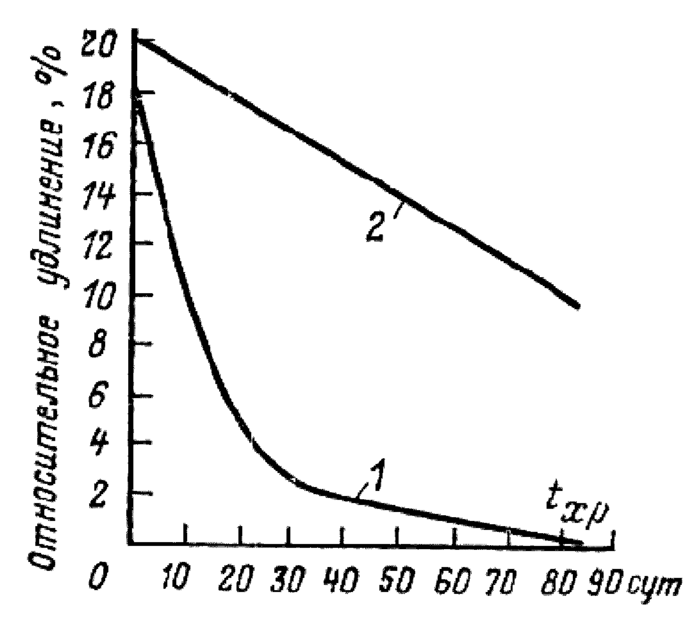


Рис. 58. Потеря эластичности стеклолакотканей марок ЛСЭ (1) и ЛСЛ (2) в процессе хранения в открытом состоянии при 20±3 °С и 55–80-процентной относительной влажности

Таблица 36

Нагревостойкость корпусной изоляции статоров со всыпными обмотками

Основной материал корпусной изоляции (тип и толщина, мм)	Обмоточный провод	Пропиточный лак	Нагрево-стойкость, °С
Стеклолакоткань ЛСЛ, 0,17	«Формвар 3536»	МЛ-92	124
Лакоткань ЛХМ, 0,12	ПЭВ-2	МЛ-92	108
Стеклолакоткань поликасиновая, 0,2	ПЭМ-2	МЛ-92	111
Стеклолакоткань ЛСЭ, 0,2	ПЭВ-2	МЛ-92	107
Пленка ПЭТФ (лавсан), 0,05	ПЭЛБО	МЛ-92	115
Пленкоэлектрокартон (на пленке хостафан), 027	ПЭТВ-F	МТМ-8	104
Пленкоэлектрокартон, 0,27	ПЭТВ-939	МГМ-8	116
Пленкоэлектрокартон (на пленке лумиррор) 0,27	ПЭТВ-939	МГМ-8	114

Таблица 37

Нагревостойкость двухслойной непрерывной изоляции

Материал	Партии	Марка	Толщина, мм	$ТИ_{20000}$ °С
Стеклолакоткань		Поликасиновая	0,17	115
	I	ЛСЭ	0,17	108
	I	ЛСБ	0,17	109
	I	ЛСЛ	0,20	108
	II	ЛСЛ	0,20	123
	III	ЛСЛ	0,20	120
Лакоткань	I	ЛХБ	0,17	114
	II	ЛХБ	0,17	110
Стеклолакоткань	I	ЛСП	0,15	126
Микалента	I	ЛМЧ-ББ	0,13	150
Стеклолакоткань	I	ЛСТР	0,19	>160

шается механическая прочность пазовой изоляции и исключаются нарушения лаковых пленок при укладке обмотки особенно в статоры двухполюсных машин, где укладка затруднена. Следует отметить, что высокая механическая прочность и эластичность стеклолакоткани марки ЛСЛ допускает ее разрезание вдоль основы (а не по диагонали или под углом 23° к утку, как все прочие стеклолакоткани и лакоткани). Для пазовой изоляции она может быть применена без

«воротничков», такой же длины, как электрокартон, и нарезаться в один прием с электрокартоном на картонорезательной машине. Будучи очень технологичными материалами, стеклоэскапоновая и стеклолатексная лакоткани успешно применяются в качестве основной изоляции обмоток. Однако нагревостойкость их даже в многослойных конструкциях, где затрудняется доступ кислорода воздуха к внутренним слоям и замедляется термоокислительная деструкция, невысока и не превышает нагревостойкости класса Е (см. табл. 36). Мнение о возможности замены микалентной изоляции стеклоэскапоновой для обмоток с изоляцией класса В технически не обосновано. Как показали опыты, эскапоновая изоляция макетов катушек якорей (пазовая часть изолирована четырьмя слоями эскапоновой стеклолакоткани толщиной 0,15 мм, лобовая — одним слоем эскапоновой стеклоленты ЛСЭК, катушки пропитаны 2 раза лаком БТ-987) старится гораздо быстрее, чем миканитовая (микабумажная) (рис. 59, а). Быстрее старится и эскапоновая изоляция макетов полюсных катушек (рис. 59, б). В качестве вспомогательной изоляции (выкладка паза) применять эластичные лакоткани не рекомендуется, т. к. при укладке обмоток, имея недостаточную жест-

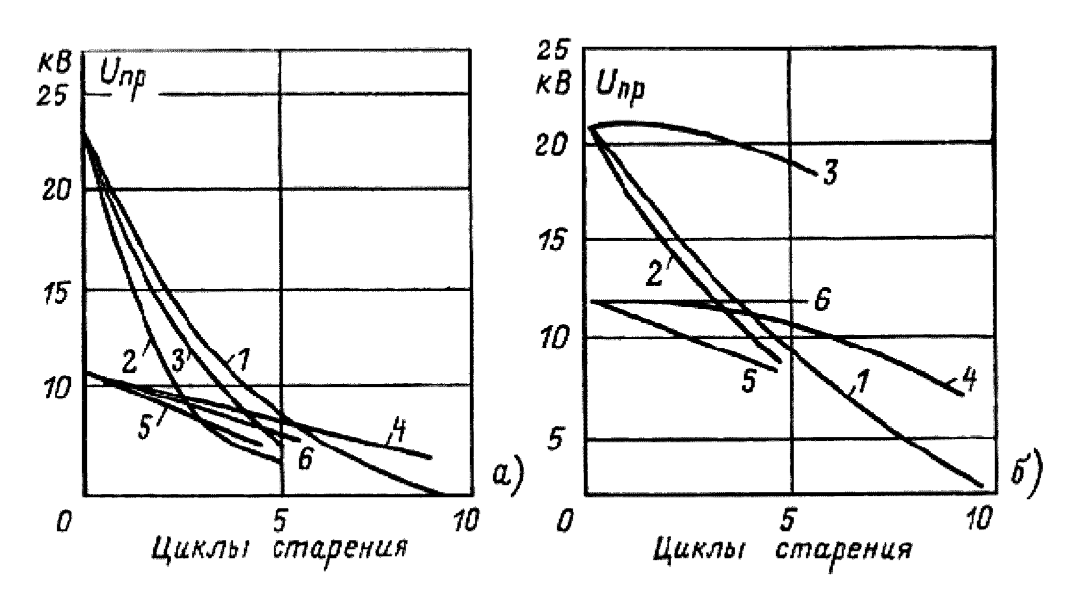


Рис. 59. Изменение пробивного напряжения изоляции макетов якорей (а) и полюсных катушек (б) в процессе теплового старения:
1 — эскапоновая изоляция при 200 °С; 2 — то же при 180 °С; 3 — при 160 °С;
4 — миканитовая изоляция при 200 °С; 5 — то же при 180 °С; 6 — при 160 °С

кость, они сминаются и сдвигаются, вследствие чего не облегчают, а затрудняют укладку. Основным недостатком стеклолакотканей на смоляных лаках (марок ЛСМ, ЛСК, ЛСБ, ЛСП) является повреждаемость их лаковой пленки при изолировании и укладке обмоток в пазы (нарушение целостности при перегибе и натяжении стеклолакотканей). Поэтому большинство стеклолакотканей применяется только в качестве вспомогательной изоляции (для выкладки паза вместо электрокартона в машинах тропического и химически стойкого исполнений, повышенной нагревостойкости и др.). Стеклолакоткань ЛСБ имеет более нагревостойкое лаковое покрытие, чем стеклолакоткани ЛСЭ и ЛСЛ, но вследствие его повреждаемости при изолировании обмоток и пазов и ускорения старения стеклолакоткани в месте изгибов изоляции на ее основе имеет в конструкции такую же нагревостойкость, как и изоляция из стеклолакотканей ЛСЭ и ЛСЛ и хлопчатобумажных лакотканей (см. табл. 36). Поэтому стеклолакоткань ЛСБ следует использовать в качестве вспомогательной изоляции для выкладки пазов электрических машин с изоляцией класса нагревостойкости В, в том числе тропического и химически стойкого исполнений.Стеклолакоткань ЛСК можно применять в качестве вспомогательной изоляции в машинах с изоляцией класса нагревостойкости Н. Она невлагостойка, нестойка к действию растворителей (ксилол) и имеет низкие технологические свойства, т. к. лаковая пленка сильно разрушается при изгибе и натяжении, но как вспомогательная изоляция обладает достаточной химо- и тропикостойкостью.

Стеклолакоткань ЛСП имеет класс нагревостойкости F. Ее можно использовать только в качестве вспомогательной изоляции для выкладки паза в машинах с изоляцией классов нагревостойкости F и Н или для изолирования лобовых частей обмоток и внутримашинных соединений в машинах невлагостойкого исполнения класса нагревостойкости В. Стеклолакоткань ЛСП имеет низкие химо- и короностойкость. Она не растворяется пропиточными лаками и меньше повреждается при изгибе, чем стеклолакоткань ЛСК, поэтому ее применение даже в машинах класса нагревостойкости Н в качестве вспомогательной изоляции предподчтительно. Стеклолакоткань ЛСМ (лакированную масляным лаком) не следует использовать в качестве основной пазовой или непрерывной изо-

ляции, т. к. она имеет очень непрочную лаковую пленку, разрушающуюся при перегибе и особенно при растяжении. Ее можно ограниченно использовать в тех случаях, когда к изоляции предъявляются требования повышенной маслостойкости. Стеклолакоткань ЛСМ имеет класс нагревостойкости А, она не химостойка и имеет очень низкую влагостойкость. Свойства стеклолакотканей приведены на рис. 60–63. В последнее время все большее применение находит новый тип самосклеивающейся стеклолакоткани ЛСТР на полиэфирно-эпоксидном лаке с пигментом. Лаковый слой в ней находится в недополимеризованном состоянии, но не имеет отлипа. После

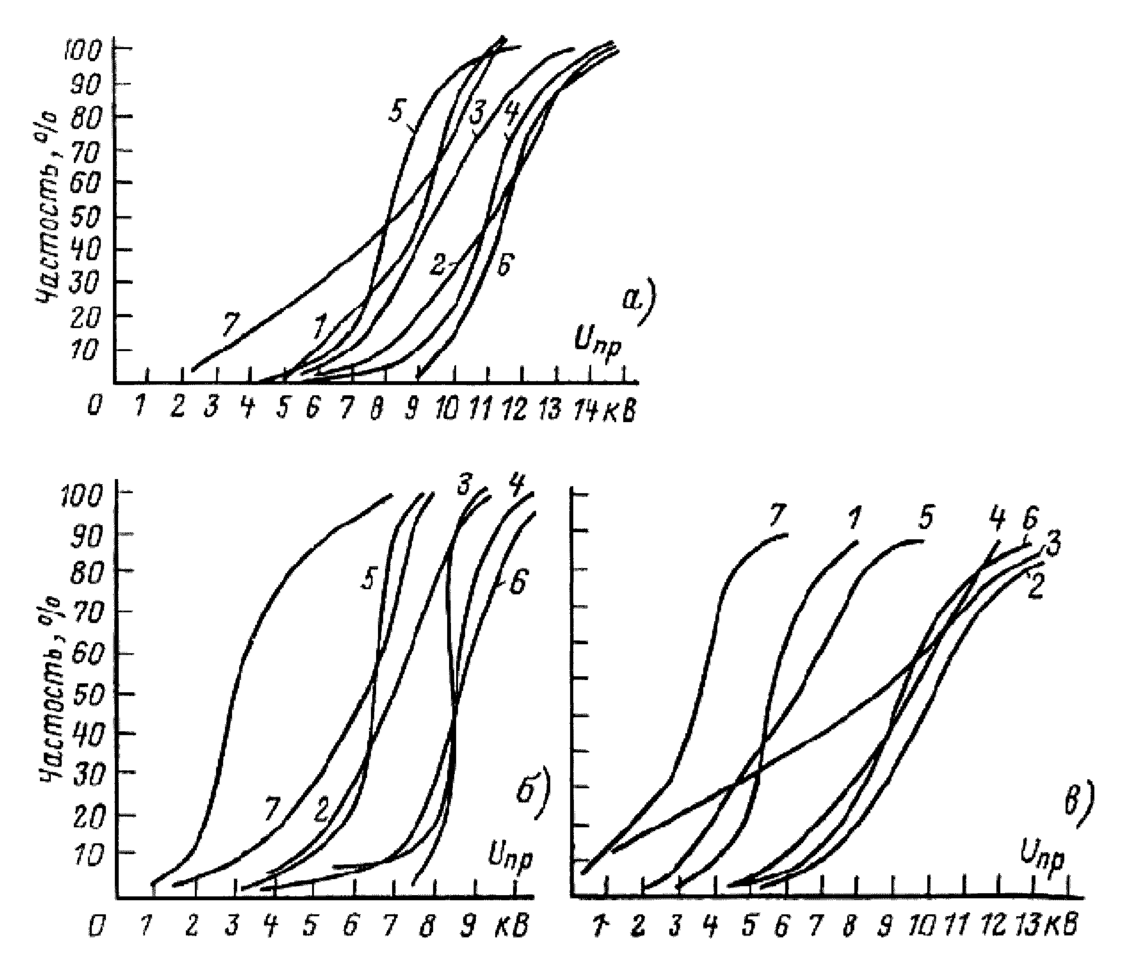


Рис. 60. Пробивное напряжение лакотканей и стеклолакотканей в состоянии поставки (а), после растяжения полосок шириной 20 мм нагрузкой 20 Н (б), после перегиба и прокатки валиком с силой 20Н (в): 1 — лакоткань ЛХС толщиной 0,2 мм; 2 — стеклолакоткань ЛСЭ, 0,2 мм; 3 — ЛСЛ, 0,17 мм; 4 — ЛСБ, 0,2 мм; 5 — ЛСП, 0,15 мм; 6 — лакоткань ЛХБ, 0,2 мм; 7 — стеклолакоткань ЛСК, 0,15 мм

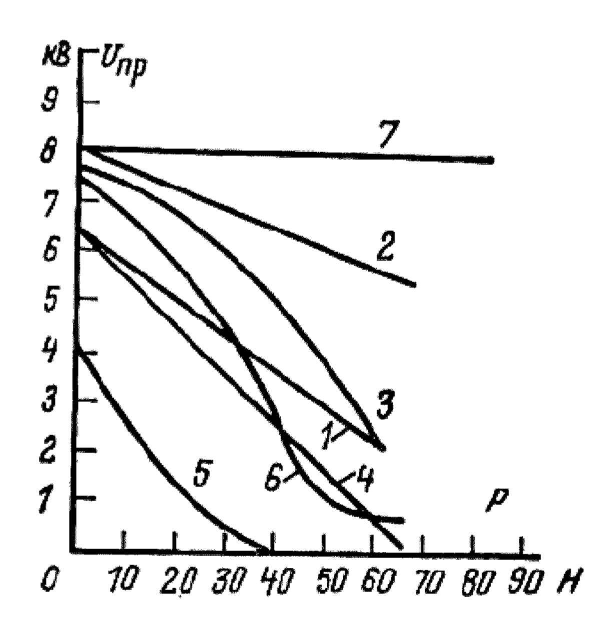


Рис. 61. Зависимость пробивного напряжения лакотканей и стеклолакотканей от растягивающей нагрузки Р:
1 — стеклолакоткань ЛСЭ толщиной 0,17 мм; 2 — ЛСБ, 0,17 мм; 3 — лакоткань ЛХБ, 0,7 мм; 4 — ЛХМ, 0,17 мм; 5 — стеклолакоткань ЛСК 0,15 мм; 6 — ЛСП, 0,15 мм; 7 — ЛСЛ, 0,20 мм

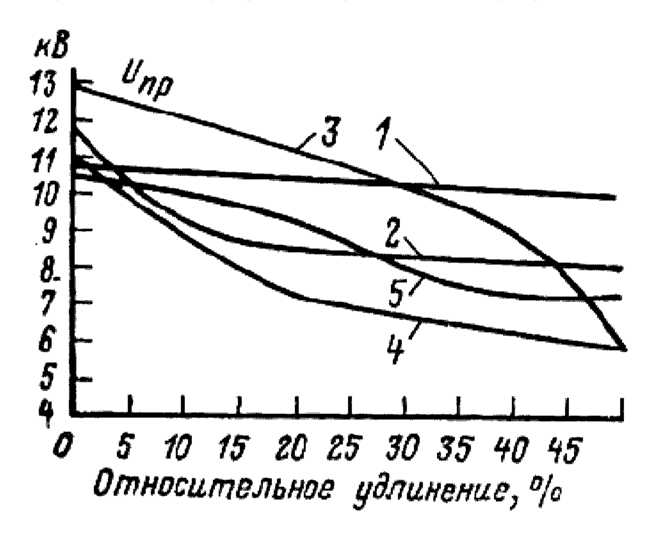


Рис. 62. Зависимость пробивного напряжения стеклолакотканей от относительного удлинения при изгибании их вокруг пластинок и последующей прокатке валиком с силой 20Н:
1 — стеклолакоткань ЛСЛ; 2 — ЛСЭ; 3 — ЛСБ; 4 — ЛСК; 5 — ЛСП

нанесения лакоткани на обмотку ее обязательно нужно запекать (например, в течение 18 ч при 170 °С), в результате чего лаковый слой размягчается, спекается и получается сплошная монолитная

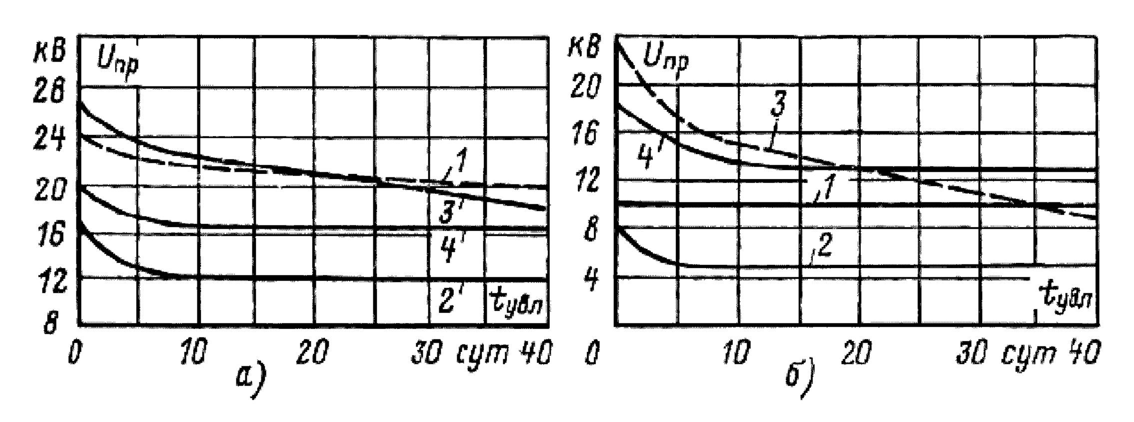


Рис. 63. Зависимость средних (а) и минимальных (б) значений пробивного напряжения $U_{пр}$ изоляции пазовых частей катушек типа АВШ от времени пребывания в атмосфере 98-процентной относительной влажности $t_{увл}$ при 20±2 °С. Катушки изолированы тремя слоями: 1 — микаленты ЛМЧ-ББ толщиной 0,13 мм; 2 — микаленты ЛФЧ-ББ, 0,13 мм; 3 — липкой эскапоновой стеклолакоткани ЛСЭК, 0,19 мм (1–3 — катушки прокомпаундированы); 4 — стеклолакоткань ЛСТР толщиной 0,2 мм

влагостойкая (см. рис. 63) изоляция. Стеклолакоткань ЛСТР имеет класс нагревостойкости F. Ее недостатками являются низкая короностойкость, резкая зависимость пробивного напряжения и тангенса угла диэлектрических потерь от температуры, вследствие чего эту стеклолакоткань нельзя применять для изоляции обмоток на напряжение 6600 В.

3.9. Материалы на основе слюды и слюдяных бумаг

Слюда представляет собой породообразующий минерал, который широко применяется в промышленности. Самыми распространенными видами слюды являются мусковит и биотит, а также флогопит. Кроме природных слюд применяются также синтетические. Использование слюды в качестве изоляции крупных турбо- и гидрогенераторов, тяговых электродвигателей и в качестве диэлектрика в некоторых конденсаторах связано с ее высокой электрической прочностью, нагревостойкостью, механической прочностью и гибкостью. Данные виды слюды отличаются относительной легкостью добывания, так, мусковит, как правило, можно найти в песчаниках и в других местах скопления обломочного материала. Мусковит отличается химической устойчивостью к различным видам воздей-

ствия. Биотит образуется путем взаимодействия гранита с магнезиальными известниками и доломитами.

Все материалы характеризуются спайностью, что придает им упругость. Слюда хорошо различается по цвету, так, цвет мусковита варьируется от бесцветного до белого (иногда имеет желтоватый цвет), а цвет биотита наоборот варьируется от черного до зеленого. Многочисленные новые слюдинитовые и слюдопластовые материалы обеспечивают в настоящее время повышение надежности электротехнического оборудования, улучшения качества и повышение удельной мощности электрических машин. Слюды — достаточно широко распространенные минералы и составляют 3,8 % массы земной коры, однако промышленные месторождения мусковита и флогопита, содержащие кристаллы достаточно крупных размеров, немногочисленны. В нашей стране крупноразмерный мусковит добывается в Карелии, в Иркутской и в Мурманской областях, а флогопит — в Мурманской области и в Якутии. За рубежом крупными слюдяными месторождениями располагает Индия.

Химический состав природных слюд может быть приближенно выражен следующими формулами:

– мусковит — $K_2O \cdot 3Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot 2H_2O$;

– флогопит — $K_2O \cdot 6MgO \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot 2H_2O$.

Кроме того, в слюды могут входить другие химические элементы, оказывающие влияние на их свойства.

В месторождениях слюду обычно находят вместе с кварцем, полевым шпатом и другими минералами. Примесь трехвалентного железа придает мусковиту коричневую или красноватую окраску, причем мусковит с такой окраской считается наилучшим. Мусковит зеленоватого цвета с примесью двухвалентного железа имеет ухудшенные диэлектрические свойства, в частности пониженное удельное объемное сопротивление.

Слюдяная изоляция из мусковита или флогопита имеет высокую химическую стойкость, причем мусковит более стоек, чем флогопит. Сильные кислоты и щелочи действуют на мусковит и флогопит только при значительной концентрации, при нагревании и длительном контакте.

По электрическим свойствам мусковит является одним из лучших электроизоляционных материалов и превосходит в этом отно-

шении флогопит. Кроме того, он более прочен механически, более тверд, гибок и упруг, чем флогопит. При нагревании слюды до некоторой температуры из нее начинает выделяться входящая в ее состав вода. При этом в результате вспучивания слюда теряет прозрачность, толщина ее увеличивается, механические свойства и электрические характеристики ухудшаются. Для различных слюд температура обезвоживания колеблется в весьма широких пределах: у мусковитов она обычно не менее 200°С, у флогопитов — не менее 800°С. Некоторые разновидности флогопита имеют более низкие температуры обезвоживания (150–250°С), что связано с повышенным содержанием воды. Такие слюды находят применение только для малоответственных целей.

Температура плавления слюд зависит от их химического состава и находится в пределах 1145–1400°С. Расплавленная слюда при застывании не образует кристаллов прежнего состава. Получаемый после остывания расплава стекловидный материал не является слюдой.

Синтетическая слюда получается путем расплавления в высокотемпературной печи шихты специально подобранного состава с последующим весьма медленным охлаждением расплава, в результате чего кристаллизуется синтетическая слюда. Синтетическая слюда, называемая фторфлогопитом, обладает более высокой химической стойкостью, нагревостойкостью, радиационной стойкостью, чем природный флогопит. Это связано с тем, что во фторфлогопите отсутствует кристаллизационная вода, гидроксильные группы OH в нем замещены на ионы фтора. Синтетическая слюда значительно дороже, чем природная. Она получается в виде сравнительно небольших кристаллов и труднее, чем природная слюда, расщепляется. По этим причинам синтетическая слюда не может рассматриваться как заменитель природной, однако она представляет большой интерес из-за высоких электрических свойств. Фторфлогопит находит применение в качестве изоляционных материалов в электронных лампах, для окон волноводов, в качестве диэлектрика конденсаторов, работающих до температуры 600–700°С, и для других изделий, применяемых в радиоэлектронике. Кроме того, на основе синтетической слюды может быть изготовлено, как и на основе природной слюды, много различных интересных для техники материалов.

Слюдяные материалы изготовляют на основе так называемой щепаной слюды. После очистки слюды от посторонних минералов при ее извлечении из горных пород она носит название забойного сырца. Забойный сырец разбирается вручную, раскалывается ножом на пластинки и обрезается. Полученная щепаная слюда применяется для производства миканитов.

Миканиты представляют собой листовые или рулонные материалы, получаемые склеиванием между собой пластинок щепаной (щипанной) слюды. В качестве склеивающих материалов применяются различные, преимущественно синтетические, смолы или лаки. Часто миканитами называют листовые материалы на основе щепаной слюды. Гибкие или рулонные материалы называются микалентой или микафолием.

В зависимости от вида применяемой слюды различают миканиты из мусковита и флогопита и их смеси. По областям применения различают пять основных видов слюдяных листовых материалов: коллекторный, прокладочный, формовочный, гибкий и термоупорный.

Различные миканитовые материалы обладают сравнительно высокой нагревостойкостью.

Коллекторный миканит, изготовляемый из флогопита, как более легко истирающийся, используют в виде штампованных заготовок, которые прокладываются между медными пластинами коллекторов электрических машин. Коллекторный миканит обладает хорошими механическими свойствами и дает малую (не более 2 %) усадку в условиях большого давления и повышенной температуры (до 160 °C).

Прокладочный миканит применяют для создания различных электроизоляционных прокладок, шайб и т. п. Он изготовляется из мусковита, флогопита или их смеси с малым количеством связующего — глифталя или кремнийорганической смолы (3÷20 %). Формовочные миканиты содержат от 5 до 20 % связующего (глифталя или кремнийорганической смолы), остальное — слюда. При нагреве они способны формоваться и сохранять приобретенную конфигурацию при охлаждении. Применяются при изготовлении коллекторных манжет, фланцев, каркасов, катушек, трубок и других изделий.

Разновидностью формовочного миканита является микафолий — один или несколько слоев щепаной слюды, склеенных лаком между собой и бумажной или стекловолокнистой подложкой, по-

крывающей слюду с одной стороны. Он применяется для изготовления твердой изоляции стержней якорных обмоток машин высокого напряжения, а изготовляется из флогопита или мусковита на глифталевом, полиэфирном или кремнийорганическом связующем.

Микалента является разновидностью гибкого миканита. Она клеится из щепаной слюды крупных размеров только в один слой и имеет подложки из стеклоткани, стеклосетки или микалентной бумаги с двух сторон. Микалента является основной изоляцией обмоток многих электрических машин высокого напряжения.

Термоупорный (нагревостойкий) миканит не содержит органического связующего. Изготовляется он на основе флогопита, связующим которого служит фосфорнокислый аммоний (аммофос).

Такой миканит, применяемый для изготовления изоляции электронагревательных приборов, способен работать при температуре в несколько сотен градусов.

Слюдиниты и слюдопласты являются разновидностью слюдяных бумаг, получаемых из слюдяных отходов без предварительной ручной щепки.

Слюдиниты, называемые за рубежом «самика», изготовляют из слюды «мусковит». Измельченная слюда с водой отливается на сетку бумагоделательной машины, в результате получается слюдинитовая бумага толщиной 10÷150 мкм. Такая бумага разрушается при соприкосновении с полярными жидкостями или водой. При пропитке и склеивании с подложками получаются листовые слюдиниты (коллекторный, формовочный, гибкий слюдинифолий (рулонный материал) и слюдинитовые ленты. Слюдинитовые материалы по свойствам приближаются к миканитовым, но, как правило, имеют пониженную по сравнению с миканитами влагостойкость и малое удлинение перед разрывом.

Слюдопластовые бумаги служат для изготовления слюдопластов (делятся по применению на те же группы, что и слюдиниты). Слюдопластовые бумаги изготовляются, как и слюдинитовые бумаги, на бумагоделательной машине, но без применения связующего. Такая технология возможна благодаря тому, что сразу после расщепления кристаллы (чешуйки) природной слюды способны прочно соединяться за счет сил межмолекулярного взаимодействия (силы когезии). По сравнению со слюдинитами слюдопласты имеют, как правило, бо-

лее высокую механическую прочность и более высокую устойчивость к воздействию электрической короны (короностойкость).

К сожалению, возможности применения слюды ограниченны, это объясняется тем, что при нагреве слюды до 500 °С начинает выделяться кристаллизационная вода, что в свою очередь увеличивает ее электропроводимость. Однако за последние 20 лет сферы применения слюды расширились, так, ее стали использовать в эмульсионных красках, в изготовлении электрических панелей и в каркасах чувствительных элементов. Кроме этого, слюда нашла свое применение в радиотехнике и электронике, т. к. слюда признана одним из лучших диэлектриков.

Помимо электроизоляционных свойств, слюда обладает теплостойкостью, влагостойкостью и, как отмечалось ранее, отличается стойкостью к воздействию химических реагентов. В большинстве случаев слюда используется в склеенном виде с сочетанием различных подложек, в качестве которых используют микалентную бумагу, либо стеклянные ткани. Все материалы, в основе которых лежит слюда, называются миканитовой электроизоляцией.

Изделия из слюды можно условно разделить на композитные материалы на основе натуральной слюды и на композитные материалы на основе слюдяных бумаг. Так, миканит, микалента и стекломиканит относятся к композитным материалам на основе натуральной слюды, а пленкостеклослюдинит, слюдинит, слюдопласт, стеклопленкослюдопласт, стеклослюдопласт к композитным материалам на основе слюдяных бумаг.

Миканит представляет собой электроизоляционный материал, который состоит из щипаной слюды. Данный материал обладает высокими изоляционными свойствами, так же обладает высокой влагостойкостью. В силу дороговизны материала применять его стоит только в том случае, если использование лакоткани недопустимо. Микалента представляет собой еще одну разновидность слюдосодержащего материала, который отличается элекролизационными свойствами и имеет обклейку только с одной стороны, приминятеся в качестве электроизаляционного материала в электрических машинах и аппаратах. Стекломиканит так же применяется в данной сфере, но только в виде межпазовой и межвитковой изоляции, еще находит свое применение в газовой изоляции электромашин.

Пленкостеклослюдинит является электроизоляционным материалом, который состоит из слоев стеклоткани, слюдяной бумаги и полиэтилентерефталатной пленки. Пленкостеклослюдинит применяется, как гибкий изоляционный материал в электромашинах и аппаратах, нагревостойкость которых не превышает 180 °С. Пленкостеклослюдинит обладает высокими электроизоляционными свойствами, хорошей влагостойкостью и может полностью заменить применяемые гибкие слюдосодержащие материалы.

Слюдиниты представляют материалы, в основе изготовления которых лежит слюдинитовая и целлюлозная бумага. Слюдиниты применяют в качестве витковой и пазовой изоляции электрических машин взамен гибкого миканита. Слюдопласт же почти аналогичен слюдиниту, только изготавливается он под воздействием определенной температуры и используется для изоляции нагревательных элементов при высокотемпературной эксплуатации.

Миканитовые материалы долгое время были единственными материалами, применявшимися для изоляции машин классов нагревостойкости В, F и Н, а также машин исполнений ХЛ и Т и работающих в химически активных средах. Их широко используют в электрических машинах, к которым предъявляются требования высокой надежности в эксплуатации. Слюда — отличный диэлектрик. В зависимости от сочетания ее с подложками и клеящими лаками получают материалы различного назначения и различных классов нагревостойкости — от В до С.

3.9.1. Слюдяные материалы

Гибкие миканиты. Листовой электроизоляционный материал, которым является миканит гибкий марки: ГФК, ГФС, ГМС, изготавливается с использованием слюды флагопит (ГФК, ГФС) и слюды мускавит (ГМС). Пластины смолы наклеиваются на стеклотканевую подложку с помощью глифталевого или масляно-битумного лака. В состав материала может входить тонкая микалентная бумага, которая покрывает слюду с обеих сторон, ее использование повышает прочностные характеристики материала. В некоторых марках гибкого миканита бумага не используется.

Механические воздействия и изгибы материала не сказываются на его электроизоляционных качествах, они остаются неизменными.

При применении для склеивания слюды лаков, длительно сохраняющих эластичность (масляно-глифталевых, масляно-битумных, эпоксидно-полиэфирных, кремнийорганических), получают гибкие миканиты без подложек (марок ГМС, ГФС, ГМЧ, ГФЧ, ГФК) или с подложками из целлюлозных бумаг (марок ГМС-ББ, ГФС-ББ, ГМЧ-ББ, ГФЧ-ББ) и гибкие стекломиканиты со стеклотканевыми подложками с одной или с двух сторон (марок ГФС-Т, ГФК-Т, ГФЭ-Т, ГФС-ТТ, ГФЭ-ТТ, ГФК-ТТ). В зависимости от числа слоев и размеров пластин слюды и числа подложек гибкие материалы могут иметь толщину 0,15–0,60 мм. Для этих материалов предподчтительно использование слюды флогопит как более эластичной. Гибкие миканиты и стекломиканиты длительно сохраняют гибкость в холодном состоянии, особенно на масляно-битумных или кремнийорганических лаках. Гибкие миканиты — влагостойкие материалы. Их можно применять без подложек или со стеклотканевыми подложками в машинах химически стойкого и тропического исполнений. Гибкие миканиты с бумажными подложками нагревостойкостью класса В можно использовать только в машинах исполнений У и ХЛ с изоляцией класса нагревостойкости В. Они более технологичны, чем неоклеенные миканиты и стекломиканиты.

Нагревостойкость неоклеенных гибких миканитов и стекломиканитов зависит от нагревостойкости клеящих лаков. Обычно считают, что гибкие миканиты и стекломиканиты на масляно-глифталевом лаке (ГФС, ГФС-ТТ и др.) относятся к классу нагревостойкости F. Однако, как показали испытания, только в случае применения для пропитки обмоток лаков класса нагревостойкости F или H, например ПЭ-933 или КО-916к, можно получить на их основе конструкцию изоляции класса нагревостойкости F. При пропитке масляно-глифталевым лаком МЛ-92 конструкция на их основе имеет нагревостойкость ниже класса F. Гибкие стекломиканиты на полиэфирно-эпоксидных лаках (марки ГФС-ТТ) более нагревостойки, чем гибкие стекломиканиты на масляно-глифталевых лаках. Их можно использовать в машинах с изоляцией класса нагревостойкости F. Гибкие стекломиканиты на кремнийорганических лаках (ГФК-ТТ и др.) относятся к классу нагревостойкости H.

Гибкие миканиты и стекломиканиты применяют в качестве основной изоляции для выкладки полузакрытых и полуоткрытых па-

зов, для изоляции пазовых частей шаблонных обмоток («мягкая» гильза), в качестве междуслойной изоляции. Следует отметить, что все же гибкие материалы на основе слюды недостаточно хорошо выдерживают значительные перегибы, поэтому их не рекомендуется применять для выкладки небольших узких пазов или обмоток малых сечений. Появление дефектов в слюде при изолировании приводит к резкому снижению срока службы конструкции. Повысить его в этом случае можно, применяя пропиточные лаки высокого класса нагревостойкости (например, ПЭ-933 и КО-916к).

Микалента на 50 % состоит из слюды, 20 % бумаги, 30 % клея и летучих веществ. Производят ее в основном в Российской Федерации и Китае.

Микаленты представляют собой гибкие в холодном состоянии слюдяные материалы с одно- или двусторонними подложками из микалентной бумаги, стеклянной ткани или стеклянной сетки. Основная область применения микаленты на масляно-битумном связующем с подложкой из микалентной бумаги (ЛМЧ-ББ) — обмотки высокого напряжения, на которые ее наносят в несколько слоев в зависимости от рабочего напряжения обмотки. Для микаленты, применяемой для корпусной изоляции обмоток высокого напряжения, используют только слюду мусковит, обеспечивающую высокую электрическую прочность изоляции. Микаленту из слюды флогопит (ЛФЧ-ББ), особенно нагревостойких сортов, для корпусной изоляции обмоток высокого напряжения применять не следует. Так как она более эластична, чем ЛМЧ-ББ, ее обычно используют для витковой изоляции обмоток высокого напряжения и для изолирования обмоток низкого напряжения машин с изоляцией класса В и влагохолодостойкого исполнения. Однако пробивное напряжение изоляции обмоток низкого напряжения, изолированных микалентой ЛМЧ-ББ, все же, как правило, ниже пробивного напряжения обмоток, изолированных микалентой ЛФЧ-ББ.

Для изолирования обмоток низкого напряжения химически стойкого и тропического исполнений, а также обмоток классов нагревостойкости F и H всех исполнений применяют микаленты с подложками из стеклоткани или стеклосетки (ЛФС-ТТ и ЛФС-ТС на масляно-глифталевом, ЛФЭ-Т и ЛФЭ-ТТ на эпоксидно-полиэфирном, ЛФК-ТТ и ЛФК-ТС на кремнийорганическом лаках).

Стекломикаленты менее эластичны и имеют несколько меньшую электрическую прочность, чем микаленты ЛМЧ-ББ и ЛФЧ-ББ, но они значительно прочнее на разрыв. Стекломикаленты на масляно-глифталевых лаках относятся к классу нагревостойкости F, однако для достижения такой нагревостойкости в конструкциях необходима пропитка достаточно нагревостойким лаком, например ПЭ-933. Стекломикаленты на полиэфирноэпоксидных лаках более нагревостойки, чем на масляно-глифталевых (рис. 64), но менее эластичны. Стекломикаленты на кремнийорганических лаках относятся к классу нагревостойкости H.

Микафолий и формовочный миканит — применяют для изготовления твердой изоляции стержней и катушек («гильзовой»), втулок, конусов коллекторов и др.

Микафолий — рулонный или листовой материал, состоящий из одного или нескольких слоев щипаной слюды (мусковит или флогопит), наклеенных на плотную телефонную бумагу толщиной 0,05 мм. В качестве связующего применяют глифталевый, масляно-глифталевый и другие лаки.

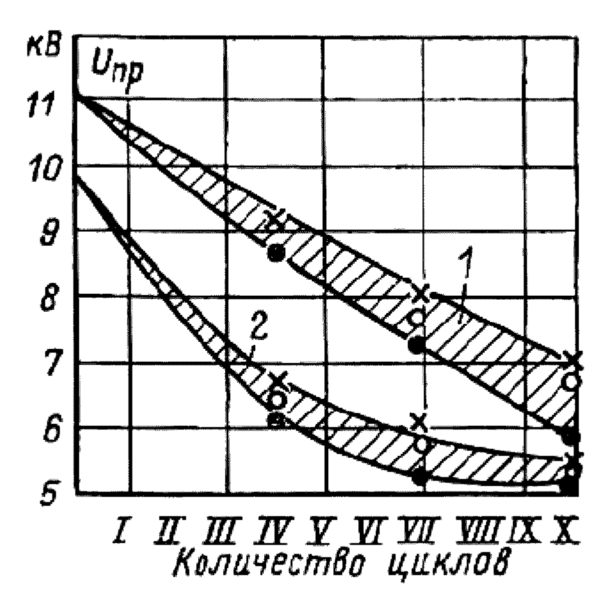


Рис. 64. Зависимость пробивного напряжения микалентной корпусной изоляции макетов (толщиной на одну сторону 0,8 мм) от числа циклов испытаний: 1 — изоляция пропитана полиэфирно-эпоксидным лаком; 2 — масляно-глифталевым лаком; • — 175 °С (25 сут в цикле); x — 200 °С (6 сут в цикле); ○ — 200 °С (2 сут в цикле)

Микафолий выпускают в рулонах шириной не менее 400 мм, толщиной 0,15; 0,20 и 0,30 мм. В микафолии (по весу) 45–65 % слюды, 30–12 % клеящих веществ, остальное бумага и летучие вещества. Микафолий, как и формовочный миканит, обладает способностью формоваться в нагретом состоянии. Из микафолия изготовляют (горячим прессованием) трубки для изоляции болтов и шпилек, гильзы для пазовой изоляции обмоток и другие фасонные изделия. Все виды микафолия относятся к классу В, т. е. могут работать при температурах до 130 °С.

Стекломикафолий является разновидностью микафолия. Его изготовляют наклеиванием листочков слюды мусковит или флогопит на бесщелочную стеклянную ткань. При этом применяются нагревостойкий кремнийорганический или другие лаки. Нагревостойкий микафолий применяется в электрических машинах с повышенными рабочими температурами (180 °С). Стекломикафолий, выпускаемый на глифталевом лаке, по нагревостойкости относится к классу В на полиэфирном лаке относится к классу F, т. е. может использоваться до 155 °С.

Эти материалы изготовляют с применением термореактивных смол — глифталевой, шеллачной, кремнийорганических, полиэфирной ТФП-18, размягчающихся при нагреве и переходящих в твердое неплавкое состояние в процессе дальнейшего нагревания и опрессовывания. Указанные материалы, приобретая гибкость и необходимую форму при нагреве, после соответствующей термообработки и опрессовывания сохраняют приданную им форму и монолитность. Полученная из формующихся материалов изоляция влагостойка и имеет высокую электрическую прочность. В зависимости от примененных лаков и подложек микафолий ммГ-Б, МФГ-Т, МФШ-Б на глифталевом или шеллачном лаке с подложками из телефонной бумаги или стеклоткани относится к классу нагревостойкости В; МФП-Т, МФП-С — на полиэфирно-эпоксидном лаке с подложками из стеклоткани или стеклосетки — к классу F. Микафолии на слюде флогопит (в обозначении буква Ф) более эластичны, и для изделий, в которых имеются большие изгибы, следует применять только их. Микафолий, имеющий бумажную подложку, может быть использован для машин исполнения У (в нормальных условиях окружающей среды) и влагохолодостойкого исполнения. Для машин тропическо-

го и химически стойкого исполнений следует применять микафолий на стеклотканевой подложке или формовочные миканиты. Диапазон толщин выпускаемых микафолиев 0,15–0,30 мм.

Формовочный миканит в отличие от микафолия не имеет подложек. Диапазон толщин 0,15–0,50 мм на полиэфирной и кремнийорганической смолах и 0,15–1,50 мм на глифталевой смоле. Формовочный миканит на глифталевой смоле (марки ФФГА) имеет класс нагревостойкости В, однако для коллекторных манжет он может быть применен и в машинах класса нагревостойкости F. Коллекторные манжеты большей монолитности и более высокой нагревостойкости изготовляют из формовочных миканитов на полиэфирной смоле (марки ФФПА). Формовочный миканит (ФФК, ФМК, ФФКА) на кремнийорганической смоле К-40 не создает достаточной монолитности изделия, но обеспечивает класс нагревостойкости изоляции Н.

Так же, как и микафолии, формовочные миканиты на слюде флогопит более эластичны в нагретом состоянии, чем формовочные миканиты на слюде мусковит (в обозначении буква М). Различают два типа формовочных миканитов: первый (в обозначении буква А) — с пониженным содержанием смолы (8–15 %), предназначен для изготовления коллекторных манжет (конусов), для которых важны минимальное размягчение и усадка в процессе эксплуатации; второй (без индекса А) — с повышенным содержанием смолы (15–25 %) — для изолирования втулок, цилиндров, реек и т. п. Формовочный миканит на глифталевом лаке в процессе изготовления манжет коллектора не обеспечивает полного отсутствия дальнейшей усадки в процессе эксплуатации, поэтому он может быть рекомендован для изготовления относительно небольших коллекторов электрических машин с небольшой частотой вращения. Для изготовления коллекторных манжет тяговых электродвигателей и при большой (3000 мин^{1} и более) частоте вращения следует применять формовочный миканит на полиэфирной смоле.

Коллекторный миканит, представляющий собой твердый прессованный материал с малым содержанием связующих (до 4 %) и малой усадкой при нагреве, используют для межламельной изоляции коллекторов.

К нему предъявляют следующие основные требования: большая равномерность по толщине, малая усадка при повышенных

давлении и температуре и отсутствие при этом вытекания смолы и скольжения пластинок слюды друг относительно друга. В зависимости от состава связующих коллекторный миканит применяют для машин классов нагревостойкости B — на глифталевой или шеллачной смоле (марок КФГ или КФШ), F — на полиэфирной смоле (марки КФП), H — на аммофосе (марки КФА). Выпускают коллекторный миканит пониженной усадки (с цифрой 1 в обозначении) и нормальной усадки (без цифры 1); диапазон толщин 0,4–1,5 мм. Коллекторный миканит на аммофосе расслаивается больше, чем миканит на шеллаке, глифталевой или полиэфирной смолах. Разработан коллекторный миканит КФП и КФП-1 на смоле ТФП-18 класса нагревостойкости F. Миканит на шеллаке иногда оклеивают слюдянитовой бумагой, что обеспечивает его большую стабильность по толщине. В процессе работы коллектора в результате воздейсвия температуры и давления может произойти ослабление усилий затяжки коллектора вследствие усадки изоляции. Для сохранения монолитности и стабильности формы коллектора в процессе эксплуатации необходимо при изготовлении коллекторов добиться полного прекращения усадки межламельной и корпусной изоляции. Как показали данные исследований, ни один из типов коллекторного миканита за 18 ч при температуре 160 °C и давлении 60 МПа не переходит в безусадочное состояние (рис. 65). Коллекторный миканит на глифталевой смоле имеет наибольшую усадку и может быть рекомендован только для коллекторов небольших диаметров тихоходных электрических машин.

Прокладочный миканит ПФГ, ПСГ, ПМГ класса нагревостойкости B на глифталевой и ПФК класса нагревостойкости H на кремнийорганической смоле представляет собой твердый спрессованный материал, применяемый в качестве прокладок в электрических машинах. Выпускается прокладочный миканит толщиной 0,5–5 мм.

Лакостекломиканит — материал, состоящий из двух слоев слюды флогопит и двух подложек — одного слоя стеклолакоткани и одного слоя стеклоткани, склеенных масляно-глифталевым, триэтиленгликолевым, эпоксидно-полиэфирным или кремнийорганическим лаком. Нагревостойкость лакостекломиканита зависит от примененных стеклолакотканей и клеящих лаков. При применении стеклолакоткани ЛСБ и глифталевого или триэтиленгликолевого лаков

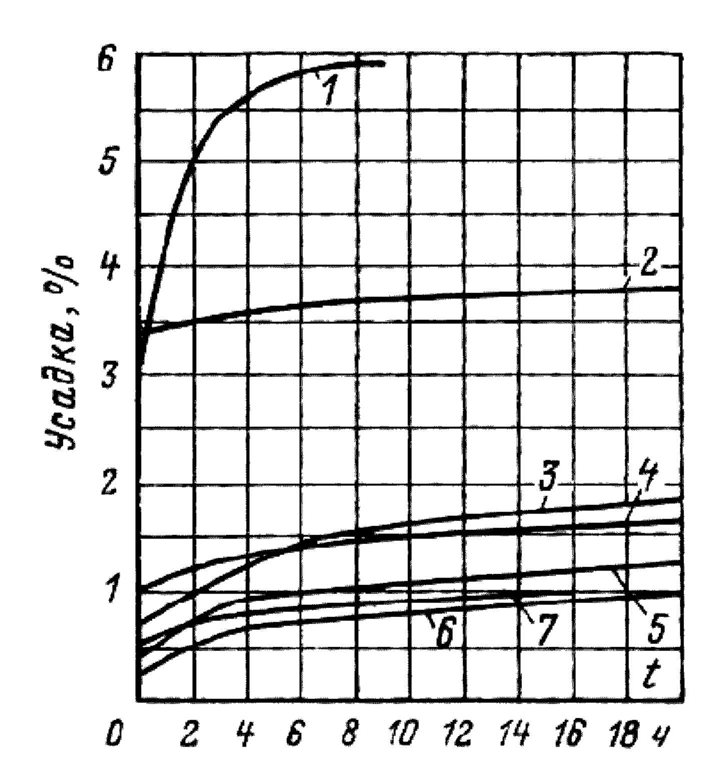


Рис. 65. Зависимость усадки материалов для межламельной изоляции от времени выдержки при 160 °С и 60 Мпа: 1 — коллекторный миканит на глифталевом лаке; 2 — то же после дополнительной термообработки; 3 — коллекторный миканит на шеллаке, оклеенный слюдинитовой бумагой; 4 — коллекторный слюдинит на лаке КО-926; 5 — коллекторный миканит на шеллаке; 6 — то же на аммофосе; 7 — коллекторный слюдопласт

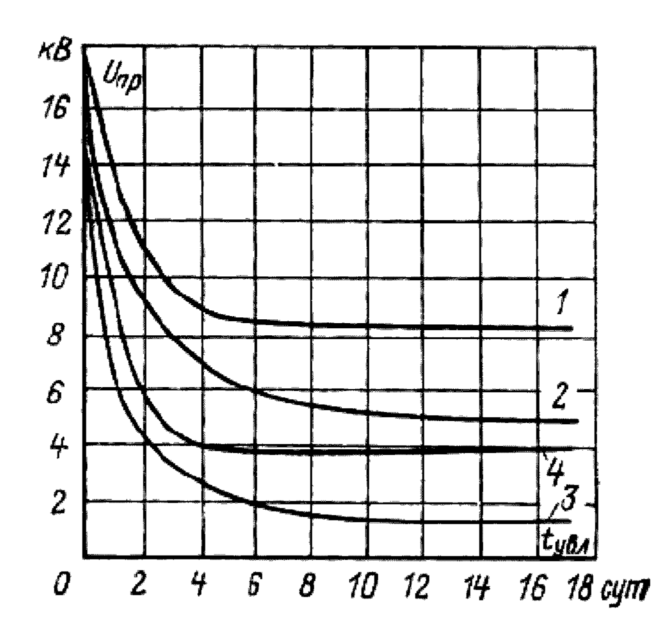


Рис. 66. Зависимость пробивного напряжения $U_{пр}$ лакостекломиканита лакостеклослюдопластов от времени пребывания в атмосфере 98-процентный относительной влажности $t_{увл}$ при 20 °С: 1 — лакостекломиканит ГФТ-Т-ЛСБ; 2 — лакостеклослюдопласт ГИТ-Т-ЛСБ; 3 — то же на масляно-глифталевом лаке; 4 — лакостеклослюдопластмусковитовый на масляно-глифталевом лаке

Таблица 38

Параметры гибких и композиционных материалов на основе слюды и слюдяных бумаг

Материал	Марка	Средняя толщина, мм	Пробивное напряжение, кВ						Сопротивление надрыву, Н, в направлении			
			в исходном состоянии		после перегиба и прокатки валиком силой 20 Н				продольном		поперечном	
					при 20 °С		после старения при 125 °С, 6 ч					
			среднее	минимальное	среднее	минимальное	среднее	минимальное	среднее	минимальное	среднее	минимальное
Лакостекломиканит	ГФТ-Т-ЛСБ	0,49	16,4	15,0	9,9	5,4	9,0	5,4	248	130	—	—
	ГФК-Т-ЛСК	0,50	11,4	9,0	8,8	7,0	6,5	5,5	520	430	340	290
Лакотканеслюдопласт	ГИТ-ЛСБ-ЛСЛ	0,55	23,0	22,0	18,8	18,0	14,3	13,0	520	460	640	570
	ГИК-ЛСК-ЛСЛ	0,55	18,5	17,0	14,2	12,0	12,3	10,0	420	350	534	450
	ГИТ-Т-ЛСБ	0,44	21,0	18,0	13,0	9,6	12,0	7,0	405	360	420	380
	ГИТ-Т-ЛСК	0,45	9,8	8,0	7,1	4,0	5,2	3,0	200	172	220	174
Стеклолакорезинослюдопласт	ГИТ-Тр-Тр	0,57	17,2	15,0	13,3	12,0	11,3	7,0	1360	1300	1190	1170
Гибкий миканит	ГФС	0,20	4,9	1,4	2,3	1,4	2,4	1,2	26	12	—	—
Гибкий амбирит	ГФЧ-ББ	0,27	8,4	5,0	2,7	2,0	—	—	45	30	—	—
Гибкий стекломиканит	ГФС-ТТ	0,35	5,7	3,8	2,6	1,2	—	—	140	100	—	—
Гибкий слюдинит	Г2СП	0,2	10,2	8,7	4,3	3,8	—	—	330	280	160	150
	ГСП	0,22	7,4	4,5	6,4	2,5	—	—	18	8	—	—

(ГФС-Т-ЛСБ, ГФТ-Т-ЛСБ) материал имеет класс нагревостойкости В; если взята стеклолакоткань ЛСП и полиэфирно-эпоксидный лак (ГФЭ-Т-ЛСП) — класс нагревостойкости F; при стеклолакоткани ЛСК и лаке ЭФ-5 (ГФК-Т-ЛСК) — класс нагревостойкости Н. Лакостекломиканит имеет высокую электрическую прочность и влагостойкость (рис. 66, табл. 38).

Он имеет удовлетворительную гибкость, его можно резать на полоски. С внедрением в производство лакостекломиканита на электромашиностроительных заводах отпала трудоемкая ручная операция склеивания гибких стекломиканитов со стеклолакотканями и повысилась надежность междуфазной изоляции, для которой в основном применяется лакостекломиканит. В связи с тем, что лакостекломиканит при укладке повреждается больше, чем композиционные слюдопласты, его применяют только для машин исполнений М и Т, т. к. он обеспечивает большую влагостойкость, чем материалы на основе слюдяных бумаг.

3.9.2. Материалы на основе слюдяных бумаг

Слюдиниты и слюдопласты. Из слюдинитовых и слюдопластовых бумаг при помощи органических и кремнийорганических связующих изготовляется широкий ассортимент материалов, аналогичных миканитовым. По сравнению с миканитовыми материалы на основе слюдяных бумаг — слюдиниты и слюдопласты — имеют следующие преимущества: большую однорядность по толщине и электрической прочности, возможность получения материалов малых толщин. Кроме того, их изготовляют из недефецитного сырья, и они значительно дешевле миканитовых. Однако эти материалы не всегда являются равноценными заменителями миканитовых, т. к. менее прочны механически и менее влагостойки. Но при соответствующем подборе пропиточных лаков и технологии изготовления изоляция на основе слюдяных бумаг может в большинстве случаев заменить миканитовую всеже следует учесть. Поэтому несмотря на то, что в номенклатуре слюдопластовых материалов предусмотрены материалы влагостойкие (буква «в» в обозначении для композиционных слюдопластов), их нельзя считать равноценными заменителями миканитовых материалов для машин тропического и морского исполнений.

Слюдинитовые материалы. Гибкие слюдиниты представляют собой аналогично миканитовым гибкие в холодном состоянии материалы, изготовленные на основе слюдинитовой бумаги и целлюлозных или стеклотканевых подложек. В зависимости от применяемых подложек и лаков гибкие слюдиниты можно использовать в машинах с изоляцией различных классов нагревостойкости. Как показали опыты, гибкий стеклослюдинит в процессе старения имеет большую усадку, чем гибкий миканит и гибкий стекломиканит (рис. 67), и хуже выдерживает разрушающие давления (рис. 68, 69). Применение гибкого слюдинита, армированного упругой стеклолакотканью ЛСБ, более целесообразно, чем армированного электрокартоном, т. к. увеличивается прочность изоляции на выходе из паза, что важ-

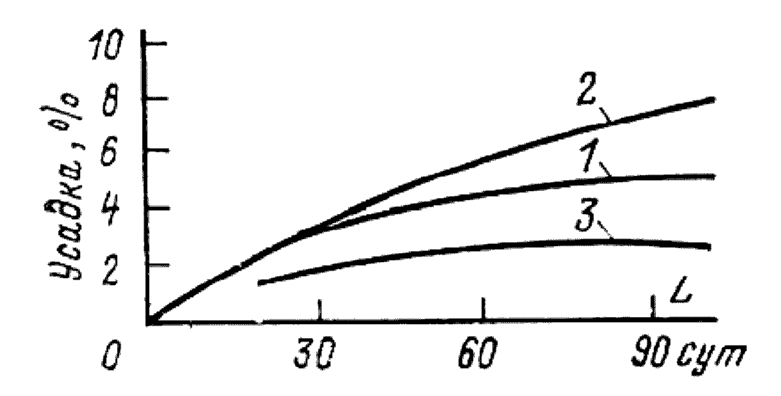


Рис. 67. Усадка гибких материалов в процессе теплового старения при 180 °С: 1 — гибкий стекломиканит на лаке ЭФ-5; 2 — гибкий слюдинит $Г_2СК$; 3 — гибкий миканит ГФС

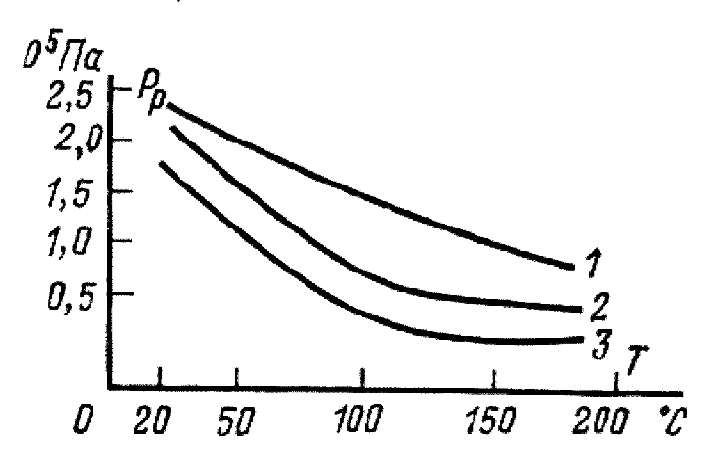


Рис. 68. Зависимость разрушающих давлений$_р$ от температуры испытаний Т: 1 — гибкий стекломиканит марки ГФК-ТТ; 2 — гибкий слюдинит $Г_2СК$; 3 — гибкий слюдинит ГСП

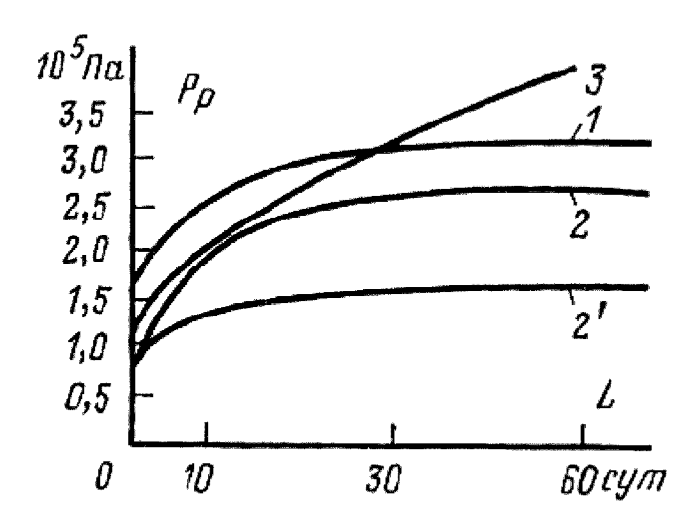


Рис. 69. Изменение разрушающих давлений при 130 °С в процессе теплового старения: 1 — гибкий стекломиканит на лаке ЭФ-5 (старение при 200 °С); 2 — гибкий слюдинит марки Г2СК (старение при 200 °С); 2' — то же старение при 180 °С; 3 — гибкий миканит ГФС (старение при 180 °С)

но при укладке обмоток, а также в процессе работы машины, обмотка которой подвергается электродинамическим усилиям. Однако к стали пакета должны примыкать твердые и упругие материалы — электрокартон или электронит. При конструировании изоляции с гибкими слюдинитами нужно учитывать, что они неупруги, поэтому в случае применения их для изоляции паза следует использовать упругие подложки достаточной толщины. Из-за недостаточной упругости нельзя применять гибкие слюдиниты для «мягких» гильз шаблонных обмоток, т. к. при изолировании в слюдините могут образоваться складки, морщины и трещины вследствие низкого относительного удлинения слюдинитовой бумаги, в результате чего может произойти пробой изоляции. В связи с низкой влагостойкостью слюдинитовой бумаги гибкие слюдиниты не следует рекомендовать для машин исполнения ХЛ и исполнения Т. Замена гибкого миканита гибким слюдинитом для витковой изоляции в виде прокладок не снижает ее пробивного напряжения (рис. 70). Испытания на срок службы пазовой изоляции в статорах показали, что изоляция с гибким слюдинитом имеет нагревостойкость такого же порядка, как и изоляция с гибким миканитом. Применение для выкладки паза вместо электрокартона стеклолакоткани повышает срок службы пазовой изоляции тем больше, чем более она нагревостойка. Пазовая

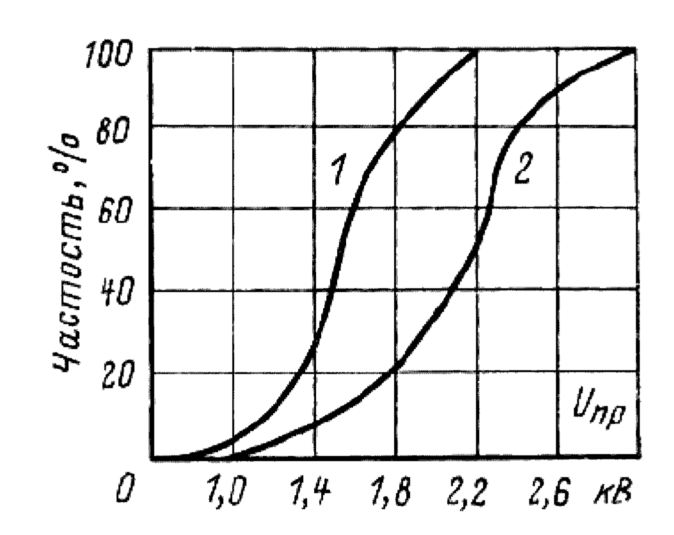


Рис. 70. Пробивное напряжение компаундированной витковой изоляции катушек из провода ПБД с дополнительными прокладками:
1 — из гибкого миканита ГФЧ-ББ толщиной 0,2 мм; 2 — из гибкого слюдинита ГСП толщиной 0,2 мм

изоляция с гибким слюдинитом при условии армирования упругими материалами может надежно работать в электрических машинах с классом изоляции В, как и миканитовая.

Слюдинитофолий СБЦ-Г представляет собой пропитанный смесью лаков ГФ-957 и ПЭ-969 или ТГФ-8 и № 420 (в соотношении 1:1) материал из слюдинитовой бумаги с целлюлозной подложкой, который, как и микафолий, при нагреве приобретает гибкость и принимает форму изделия, на которое он наносится. При дальнейшей термообработке и опрессовывании слюдинитофолий переходит в твердое состояние и приобретает значительную монолитность. В первый период работы под влиянием нагрева твердая изоляция из слюдинитофолия может несколько размягчиться, но в дальнейшем в результате запекания при эксплуатации размягчение изоляции прекращается. Слюдинитофолий более равномерен по толщине, чем микафолий, более технологичен и не вспухает в процессе эксплуатации. Он более хрупок в холодном состоянии и обладает меньшим сопротивлением надрыву, в связи с чем должен наноситься на изделие в нагретом состоянии. Слюдинитофолиевая изоляция имеет не меньшую электрическую прочность, чем микафолиевая, такую же влагостойкость, нагревостойкость и механическую прочность (рис. 71 и табл. 39).

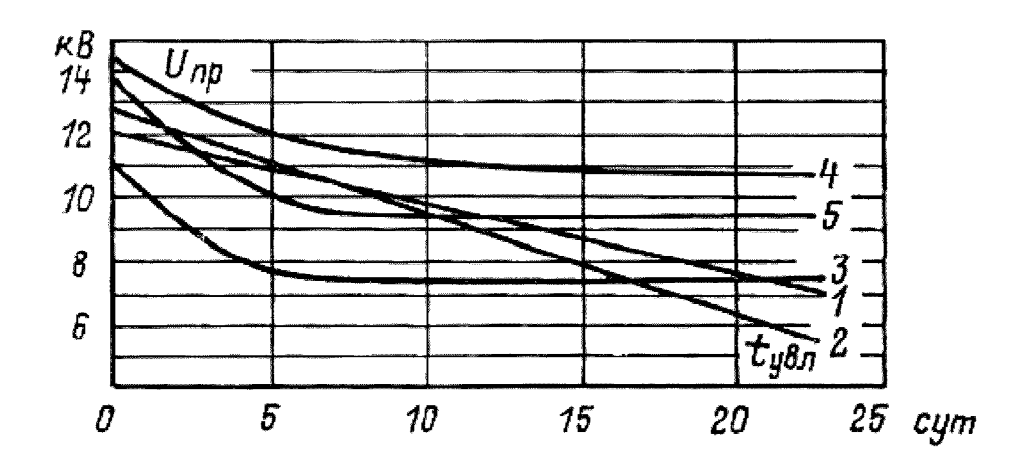


Рис. 71. Зависимость среднего пробивного напряжения пазовой изоляции роторных стержней от времени пребывания в атмосфере 98-процентный относительной влажности воздуха $t_{увл}$; 1 — микафолиевая гильза толщиной 0,7 мм; 2 — слюдинито фолиевая 0,7 мм; 3 — стеклослюдинитофолиевая 0,6 мм; 4 — слюдопластофолиевая на мусковите 0,6 мм; 5 — слюдопластофолиевая на флогопите 0,6 мм

Таблица 39

механическая прочность гильзовой изоляции роторных стержней

Материал для гильзы	Толщина изоляции на обе стороны, мм	Пробивное напряжение в исходном состоянии, кВ		Пробивное напряжение после 500 ударов, кВ		Потеря электрической прочности, %	
		среднее	минимальное	среднее	минимальное	средней	минимальной
Слюдинитофолий СБЦГ	1,4	14,6	8,0	5,5	3,0	52	60
Микафолий МФГ-Б	1,4	17,6	16,3	7,5	3,0	56	80
Слюдопластофолий мускавитовый ИМГ-Б	1,2	10,9	4,0	5,3	3,2	50	20
Слюдопластофолий ИФГ-Б	1,2	12,1	9,5	5,7	3,0	53	68

Формовочный слюдинит представляет собой твердый электроизоляционный материал, состоящий из слюдинитовой бумаги, склеенной связующим (шеллачным, глифталевым, кремнийорганическим лаком) без подложки или со стеклотканевой подложкой, который под действием нагрева и давления формируется в фасон-

ные детали. Формовочный слюдинит механически менее прочен, чем формовочный миканит, поэтому замена миканита слюдинитом не может производиться автоматически.

Коллекторный слюдинит изготовляют из слюдинитового картона с применением в качестве связующих шеллачной, шеллачно-эпоксидной и кремнийорганической смол. По усадке, равномерности по толщине и штампуемости коллекторные слюдиниты лучше коллекторных миканитов, но уступают им по механической прочности, влагостойкости и искростойкости. Коллекторные слюдиниты применяют в качестве межламельной изоляции коллекторов электрических машин, работающих в нормальных условиях окружающей среды. Нагревостойкость коллекторных слюдинитов зависит от выбора связующих: класс В — при шеллачно-эпоксидном, класс F — при полиэфирном и класс Н при кремнийорганическом связующем. Коллекторный слюдинит имеет такую же усадку, как и коллекторный миканит на шеллаке. Более перспективным материалом для межламельной изоляции является коллекторный слюдопласт.

Слюдинитовые и стеклослюдинитовые ленты. При применении слюдинитовых лент взамен микаленты следует учитывать специфические свойства микаленты и слюдинитовой изоляции. Микаленты для получения плотной изоляции накладывают на обмотку со значительным натяжением, при этом микалентная бумага несколько удлиняется, а отдельные пластинки слюды незначительно смещаются одна относительно другой. Слюдинитовая бумага обладает ничтожным относительным удлинением и невысокой механической прочностью, поэтому при натяжении слюдинитовой ленты, состоящей из слюдинитовой бумаги, оклеенной с двух сторон микалентной бумагой при помощи клеящего лака БТ-95, слюдинитовая бумага рвется. При замене хотя бы одной подложки из микалентной бумаги стеклотканью или стеклосеткой, которые также имеют малые относительные удлинения при натяжении, разрыва слюдинитовой бумаги в стеклобумослюдинитовой ленте не происходит (рис. 72). Однако стеклянные подложки в стеклослюдинитовой ленте эффективно предохраняют слюдинитовую бумагу лишь от воздействия продольных нагрузок, но не от смятия и образования складок, трещин и т. п. Все слюдинитовые ленты изготовляют обязательно со стеклянными подложками. Широкое примнение в основном нашли три типа

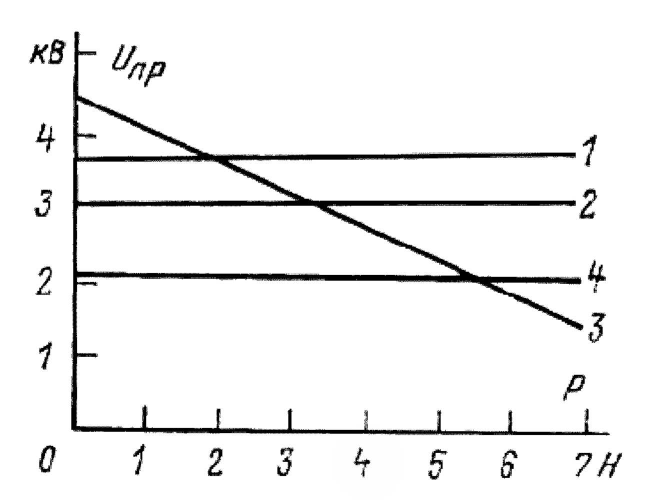


Рис. 72. Зависимость пробивного напряжения изоляционных лент от растягивающего усилия Р: 1 — микалента ЛМЧ-ББ толщиной 0,17 мм; 2 — слюдопластовая лента ЛИФЧ-ББ, 0,13 мм; 3 — слюдинитовая лента с подложками из микалентной бумаги на лаке БТ-95, 0,15 мм; 4 — стеклобумослюдинитовая лента на лаке БТ-95, 0,17 мм

слюдинитовых лент: ЛТСС-3, ЛТСС-5 и ЛТСС-3У, пропитанные эпоксидным лаком, предназначенные в основном для обмоток высокого напряжения; пропитанные лаками ЭФ-5 и К-43а для витковой изоляции якорных обмоток; ЛС4О-ТТ и ЛС4О-ТТ2,5 — сухие ленты, предназначенные для изоляции типа «монолит» и состоящие из слюдинитовой бумаги, приклеенной при помощи каучукового связующего к подложкам из стеклянной ткани. Содержание связующего в этих лентах 3–3,5 %. В дальнейшем изоляция, выполненная сухой лентой с помощью вакуум-нагнетательной пропитки, насыщается эпоксидным компаундом до 30–35 % к ее общей массе. Ленты для изоляции типа «слюдотерм» выпускаются для разных областей применения — для механического наложения на стержни высокого напряжения (ЛТСС-3), для ручного изолирования (ЛТСС-5) и для обмотки низкого напряжения (ЛТСС-3У). После запечки изоляции из указанных лент получается монолитная изоляция «слюдотерм» с электрической прочностью примерно 30 МВ/м и основными свойствами, превосходящими свойства микалентной компаундированной изоляции. Однако изоляция «слюдотерм» — жесткая и может быть применена только для прямых частей обмоток. Стеклослюдинитовую ленту на кремнийорганическом лаке применяют в основном для витковой изоляции якорных обмоток классов

нагревостойкости F и H, для изоляции лобовых частей роторных стержней и полюсных катушек. Для корпусной изоляции шаблонных катушек стеклослюдинитовые ленты на кремнийорганическом лаке, как правило, непригодны, т. к. изоляция на их основе недостаточно монолитна и механически непрочна.

Слюдопластовые материалы. На основе слюдопластовых бумаг разработаны изоляционные материалы, аналогичные миканитовым: коллекторный слюдопласт на шеллаке, глифталевом лаке, лаке КО-916к и аммофосе; прокладочный и формовочный слюдопласты на шеллаке и глифталевом лаке, а также материалы типа микаленты, гибких миканитов и микафолия и композиционные материалы для пазовой и междуфазной изоляции. По данным испытаний, коллекторный и прокладочный слюдопласты не уступают по своим свойствам коллекторному и прокладочному миканиту. В отличие от слюдинитовых лент слюдопластовые ленты, склеенные лаком БТ-95 с микалентной бумагой (марок ЛИМЧ и ЛИФЧ), можно применять для корпусной изоляции обмоток высокого напряжения, т. к. пробивное напряжение слюдопластовой ленты при натяжении снижается незначительно (рис. 73, табл. 40), что позволяет получить

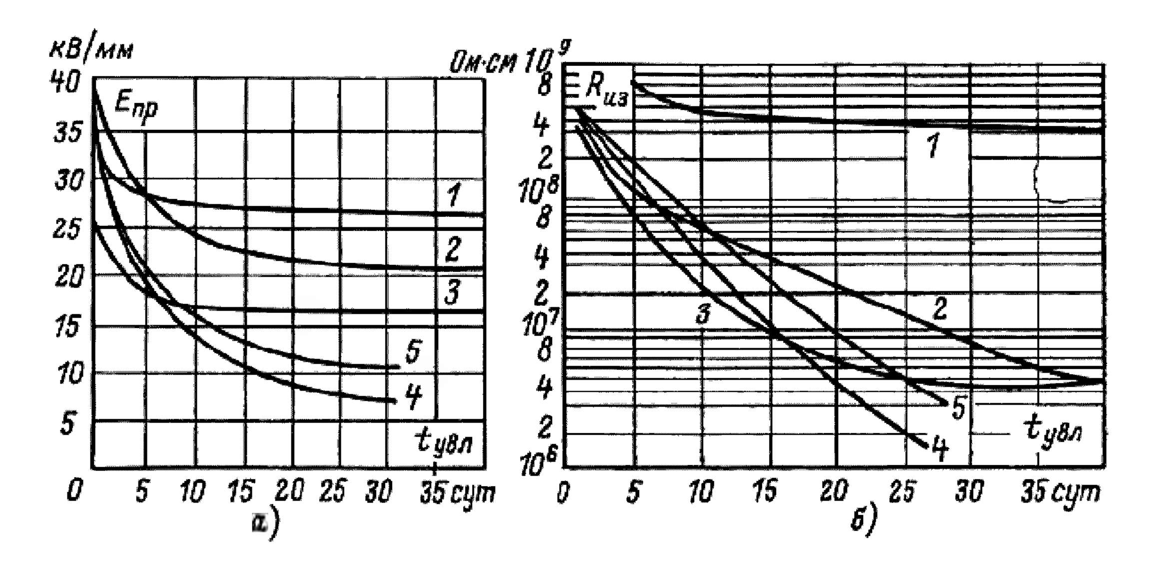


Рис. 73. Зависимость электрической прочности $E_{пр}$ (а) и сопротивления $R_{из}$ (б) электроизоляционных материалов от времени пребывания $t_{увл}$ в атмосфере 98-процентной относительной влажности:
1 — пленкоэлектрокартон с полиэтилентерафталатной пленкой;
2 — пленкоэлектрокартон с триацетатцеллюлозной пленкой; 3 — гибкий миканит ГФЧО; 4 — лакоткань ЛХБ; 5 — лакоткань ЛХМ

Таблица 40

Свойства слюдопластовых лент

Лента	Толщина, мм			Пробивное напряжение, кВ					
	средняя	минимальная	максимальная	в исходном состоянии		после перегиба вокруг пластинки толщиной 3 мм		после растяжения силой 60 Н	
				среднее	минимальное	среднее	минимальное	среднее	минимальное
Микалента ЛМЧ-ББ	0,17	0,13	0,25	3,4	1,2	2,5	0,8	3,4	1,2
Слюдопластовая ЛИМЧ-ББ	0,13	0,11	0,16	3,4	1,2	3,4	1,2	2,6	1,2
Слюдопластовая ЛИФЧ-ББ	0,13	0,11	0,15	3,5	1,8	2,5	1,2	2,6	1,8

качественную корпусную и витковую изоляцию катушек высокого напряжения.

Слюдопластовая лента эластичнее микаленты (лучше утягивается) и имеет более равномерную толщину, вследствие чего уменьшается толщина витковой изоляции при замене микаленты слюдопластовой.

Опыт применения и испытания слюдопластофолиев на глифталевом и глифталь-бакелитовом лаках, как с подложками из микалентной бумаги (марок ИФГ-Б и ИФГ-БII), так и без них (марок ИФГ, ИФГ-II) показал, что изоляция роторных стержней при применении слюдопластофориев по свойствам не уступает изоляции на основе микафолия и слюдинитофолия. Слюдопластофолии на глифталевом и глифталь-бакелитовом лаках могут быть применены для обмоток с классом нагревостойкости B, а стеклослюдопластофолий на лаке ТФП-18 — для обмоток с классом нагревостойкости F. Гибкие слюдопластовые материалы более упругие и механическипрочные, чем слюдиниты, лучше сохраняют электрическую прочность при изгибании, чем гибкие миканиты, и, будучи армированы стеклотканью или стеклосеткой, в ряде случаев могут заменять миканиты.

Специфические свойства слюдопластовых материалов, пропитанных эластичными лаками (сочетание упругости с гибкостью), позво-

лили создать композиционные материалы для пазовой и междуфазной изоляции — лакотканеслюдопласты и лакостеклослюдопласты.

3.10. Слюдопластовые композиционные материалы

Композиционные материалы на основе слюды — лакостекломиканиты, применяемые в машинах тропического исполнения, имеют недостаток, присущий всем слюдяным материалам, — низкую стойкость к изгибу. Поэтому создана гамма материалов на основе слюдопластовых бумаг (обычно два слоя), армированных с двух сторон стеклолакотканями и стеклотканями, реже с одной сторон применяется полиэтилентерефталатная пленка. Основной компонент этих материалов — слюдопластовая бумага, пропитанная лаком с соответствующим температурным индексом (триэтиленгликолевым ПЭ-969 — 140°С, полиэфирным ПЭ-942 — 155°С, кремнийорганическим — 180°С), обеспечивает в конструкции изоляции необходимую электрическую прочность и указанную выше нагревостойкость. Подложки несут функции механической защиты слюдопластовых бумаг и в первую очередь определяют механическую прочность композиционного материала, прежде всего стойкость к надрыву. Стеклолакоткань выбирают в зависимости от класса нагревостойкости материала: марки ЛСБ или ГИТ-Т-ЛСБ (температурный индекс 140°С), ЛСП — для ГИТ-Т-ЛСП (класс нагревостойкости F), ЛСК — для ГИК-Т-ЛСК (класс Н). Толщина таких материалов 0,45 мм. Для пазовой изоляции применяют композиционные материалы, армированные с двух сторон стеклолакотканями, причем одна сторона должна быть выполнена обязательно из стеклолакоткани ЛСЛ, т. к., нарезанная вдоль утка или основы, она обладает высоким сопротивлением надрыву. Вторую стеклоткань выбирают в зависимости от класса нагревостойкости материала: ЛСБ-ГИТ-ЛСБ-ЛСЛ, ЛСП — для ГИП-ЛСП-ЛСЛ, ЛСК — для ГИК-ЛСК-ЛСЛ. Применение композиционных материалов позволяет избежать двух и трехслойной изоляции в пазу и между фаз. При выкладке пазов лакотканеслюдопластами снижается трудоемкость изготовления изоляции (одна коробочка вместо трех), уменьшается ее толщина с 0,7 до 0,55 мм (на одну сторону), обеспечиваются высокий уровень электрической прочности и отсутствие надрывов

изоляции на выходе из паза при укладке обмотки. Влагостойкость лакотканеслюдопластов высокая, однако в изделиях тропического исполнения их, как и все слюдинитовые и слюдопластовые материалы, применять не рекомендуется. Так как междуфазная изоляция подвергается меньшим надрывающим усилиям, то для нее обычно испорльзуют композиционные материалы, армированные с одной стороны стеклотканью, с другой — стеклолакотканью. Композицию укладывают стеклолакотканью ЛСЛ к стали сердечника. При этом обеспечиваются максимальная стойкость изоляции к надрывающим усилиям при укладке обмоток, лучшее скольжение обмотки по пазовой изоляции (стеклолакоткань ЛСЛ тормозит скольжение витков) и отсутствие отрицательного влияния стеклолакоткани ЛСЛ на нагревостойкость системы изоляции в случае использования материалов в машинах классов нагревостойкости F и H. Толщина лакостеклослюдопластов 0,55 мм. В случае необходимости применения более тонких материалов (0,4 мм) стеклолакоткань ЛСЛ заменяют полиэтилентерефталатной пленкой. Но такой композиционный материал более жесткий (ГИТ-ЛСБ-ПЛ, ГИП-ЛСП-ПЛ). Если требуется материал с особо высоким сопротивлением надрыву, следует применять стеклолакорезинослюдопласт марки ГИТ-Тр-Тр, представляющий собой два слоя слюдопластовой бумаги армированной с двух сторон утолщенной стеклотканью, пропитанной небольшим количеством каучукового лака. Композиционные слюдопластовые материалы выпускаются влагостойкие и невлагостойкие (с буквой «в» в обозначении и без буквы «в»), но существенной разницы по влагостойкости между ними не наблюдается, поэтому для машин исполнений ХЛ и Т их рекомендовать не следует.

3.11. Синтетические пленки и ленты

Гибкие пленочные материалы из синтетических смол позволяют значительно сократить толщину изоляции вследствие их высокой механической и электрической прочности. Различные пленочные материалы неравноценны по своим свойствам и поэтому получили разную степень применения. Разработанные ранее других пленки на основе эфиров целлюлозы — триацетатцеллюлозные и ацетобутиратцеллюлозные не нашли широкого распространения в качестве

изоляции электрических машин прежде всего из-за недостаточной механической прочности (стойкости к надрывающим усилиям). Эти пленки использовали для изоляции обмоток, склеивая их с упрочняющими целлюлозными подложками (бумагами или картонами). Они не обладают никакими преимуществами по сравнению с разработанными позднее более механически прочными и нагревостойкими полиэтилентерефталатными пленками и вытеснены последними. Благодаря их высокой механической прочности (прежде всего стойкости к надрыву) полиэтилентерефталатные пленки можно применять в неармированном состоянии. В основном их используют для изоляции пазов, катушек и лобовых частей стержней в машинах с длительной рабочей температурой до 120, иногда до 130°С. Полиэтилентерефталатные пленки (ПЭТФ) — лаквсан (Россия), терфан (Франция), мелинекс (Англия), майлар (США), монтивел (Италия), лумиррор (Япония), хостафан (Германия) — обладают высокими электроизоляционными свойствами и высокой механической прочностью (табл. 41).

Таблица 41

Пробивное напряжение и сопротивление надрыву пленок

Материал	Толщина, мм	Пробивное напряжение, кВ				Сопротивление надрыву в скобе, Н, в направлении			
		в исходном состоянии		после перегиба и прокатки валиком силой 20 Н		продольном		поперечном	
		среднее	минимальное	среднее	минимальное	среднее	минимальное	среднее	минимальное
ПЭТФ мелинекс	0,05	9,5	3,0	6,6	5,3	299	182	354	260
ПЭТФ монтивел	0,06	10,3	4,6	8,1	4,6	226	205	279	250
ПЭТФ лумиррор	0,05	8,7	6,8	6,7	5,0	282	200	225	200
Поликарбонатная пленка	0,05	18,6	17,6	—	—	146	134	176	95
Электрокартон	0,20	2,6	1,2	—	—	62	49	—	—
Пленкоэлектрокартон на хостафане	0,27	12,7	10,5	—	—	357	280	—	—
Плиимидная пленка ПМ	0,035	4,4	3,4	3,6	3,4	130	120	—	—

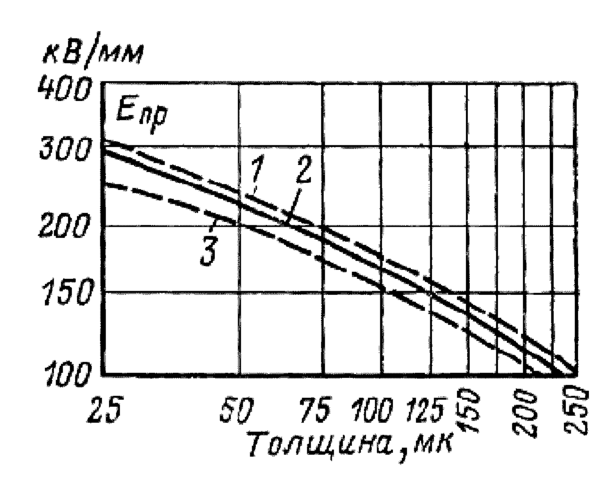


Рис. 74. Зависимость электрической прочности $E_{пр}$ пленок майлар разной толщины от относительной влажности воздуха: 1 — 20-процентная относительная влажность; 2 — 35-процентная; 3 — 80-процентная

Полиэтилентерефталатные пленки влагостойки (рис. 73, 74), стойки к растворителям пропиточных лаков, большинству кислот невысокой концентрации, плесени, и их можно использовать в машинах исполнения Т. Они не стойки к воздействию активных фенолов и креозолов и концентрированных растворов щелочей и кислот. При очень высоком пробивном напряжении пленки ПЭТФ не стойки к длительному воздействию высокого напряжения, не обладают короностойкостью, их нельзя применять для обмоток высокого напряжения. Пленки ПЭТФ длительно сохраняют свои механические свойства при 120°С, но при 150°С через 10 сут становятся хрупкими (рис. 75), однако электрическую прочность сохраняют при 150 °С в течение более чем 60 сут (рис. 76). Они относятся к классу нагревостойкости Е.

Пленки ПЭТФ применяют как в чистом виде (например, ленточная изоляция проводов ППЛБО, пазовая изоляция микромашин), так и в сочетании с целлюлозными, синтетическими, асбестовыми и стеклянными бумагами. Нагревостойкость композиционной изоляции в большой степени зависит от подложек, с которыми сочетаются пленки ПЭТФ. В сочетании с целлюлозными подложками изоляция не достигает класса нагревостойкости Е и относится к классу А. При замене целлюлозного электрокартона картонами и бумагами на основе полиэтилентерефталатных, полиамидных или асбестовых волокон нагревостойкость изоляции с полиэтилентерефталатными пленками повышается до классов В и F.

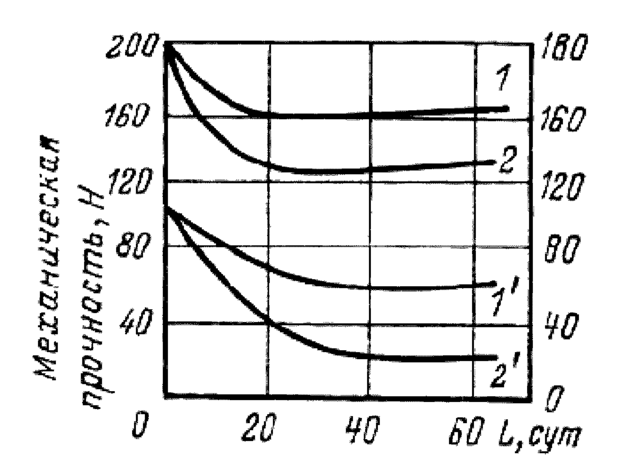


Рис. 75. Зависимость относительного удлинения при разрыве (1', 2') и механической прочности пленки ПЭТФ (1, 2) от времени старения:
1, 1' — пленка хостафан при 120 °С; 2, 2' — то же при 150 °С

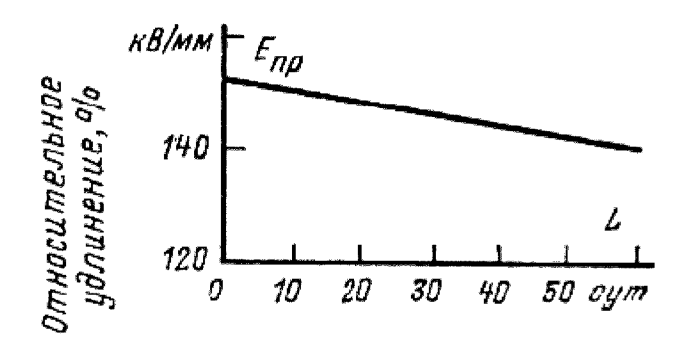


Рис. 76. Зависимость электрической прочности $E_{пр}$ пленки хостафан от времени старения при 150 °С

Электрическая прочность более тонких пленок выше, чем толстых (рис. 77). Сопротивление надрыву и жесткость пленок по мере увеличения толщины увеличиваются. Пленки ПЭТФ нельзя применять в трансформаторном масле, т. к. они после пребывания в течение 5–30 сут в трансформаторном масле при 105–120 из прозрачных становятся матовыми, легко ломаются и рассыпаются в порошок. Применение полиэтилентерефталатных пленок позволяет резко сократить толщину пазовой изоляции, что повышает коэффициент заполнения паза. Поликарбонатные пленки гибки и упруги, обладают высокой влагостойкостью и относятся по нагревостойкости к классу В. Однако эти пленки не нашли широкого применения в качестве изоляции электрических машин из-за

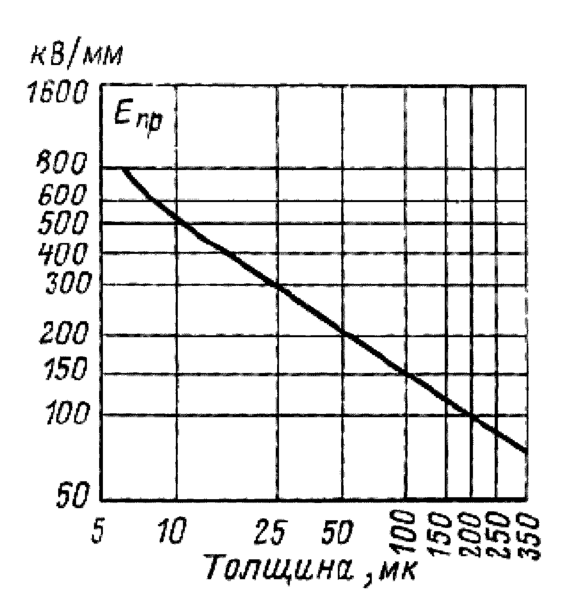


Рис. 77. Зависимость электрической прочности $E_{пр}$ пленок майлар от их толщины

недостаточного сопротивления надрывающим усилиям. Все более широкое применение находят полиимидные ленки на основе ароматического полиимида — продукта реакции пиромеллитового диангидрида с ароматическими диаминами. В нашей стране пленки выпускаются толщиной от 0,0075 до 0,13 мм и имеют марку ПМ. За рубежом изготовляется полиимидная пленка «Кэптон» (фирма «Дюпон»). Пленки имеют высокие электрическую и механическую прочность, близкую к прочности полиэфирных (рис. 78), и наряду с эхтим обладают высокой химо-, холодо- (–195°С) и нагревостойкостью (200°С). Механические и электрические свойства пленок прекрасно сохраняются в течение длительного времени (до 1000 ч) при 300°С. При 500°С предел ее прочности на разрыв 32 МПа, а приминус 269°С пленка изгибается без излома вокруг стержня диаметром 6 мм. Пленка неплавка, негорюча и при непосредственном воздействии пламени только обугливается. Пленка «Кэптон» Н может выдержать до наступления хрупкости нагревание при 250°С в течение 10 лет. Температура нулевой прочности пленки (разрыв в течение 5 с под нагрузкой 0,14 МПа) свыше 800°С, т. е. на 250°С выше, чем у алюминия. Все перечисленные данные приведены для пленки толщиной 0,05 мм. Короностойкость полиимидных пленок ограничена. В связи с дороговизной полиимидных пленок их при-

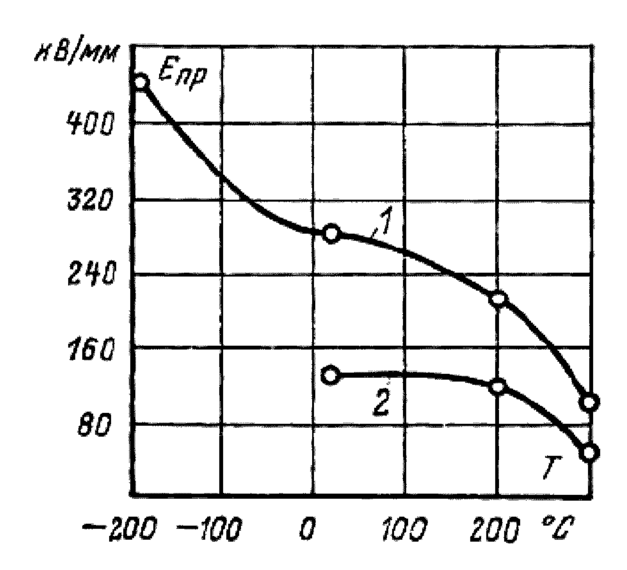


Рис. 78. Зависимость электрической прочности $E_{пр}$ пленок кэптон от температуры: 1 — толщина пленки 0,001"; 2 — толщина пленки 0,003"

менение, особенно в чистом виде, в машинах массового выпуска вряд ли целесообразно.

В криогенных условиях полиимидные пленки имеют более высокое пробивное напряжение, чем в нормальных. Это, очевидно, объясняется вымораживанием влаги. С 1970 г. за рубежом выпускаются полигидантоиновые пленки класса нагревостойкости F. При кратковременном воздействии температуры 230С пленки сохраняют стабильность размеров (усадка 1 %). Механические и диэлектрические свойства полигидантонновых пленок не изменяются при температуре вплоть до 260С. Они стойки к водным растворам кислот и щелочей даже при их кипении, имеют высокую стойкость к гидролизу и к большинству органических растворителей, но растворимы в метиленхлориде и таких сильнополярных растворителях, как демитилформамид, диметилацетамид, фенол и т. д. Важным свойством пленок является совместимость их с пропиточными составами, например с полиэфиримидами, насыщенными полиэфирамидами и т. д. При отверждении между пленкой и смолой образуются прочные адгезионные связи. Пленки могут быть использованы в комбинации с неткаными материалами на основе полиэфирного и полиамидного волокон. Пленки с покрытием из термореактивных адгезивов или фторсодержащих полимеров применяют для изоляции прямоугольных медных проводников крупных машин.

Изоляционные ленты на основе различных пленочных материалов применяются преимущественно в виде липких лент или комбинированных материалов с использованием тех или иных подложек. Для лент из полиэфирных пленок рекомендуются клеи на основе акриловых смол, для отверждения которых не требуется нагрева. Такие ленты эластичны и устойчивы к действию масел и растворителей. Для изоляции катушек машин с особо тяжелыми условиями работы применяют полиимидные пленки, покрытые с одной или двух сторон пленкой из политетрафторэтилена, что дает возможность горячего спекания ленты и повышает монолитность изоляции (снижаются паропроницаемость и термоокислительная деструкция). Для изоляции класса нагревостойкости H, работающей в условиях высокой влажности, выпускают ленты из гетеросилоксановой резины ЛЭТСАР, которые после нанесения на обмотку самосклеиваются без запекания и образуют монолитную влагостойкую и электрически прочную изоляцию Электрическая прочность резиновых лент удовлетворительная (25–30 кВ/мм), нагревостойкость — класса H. Однако механическая прочность (особенно на прокол и ударное смятие) недостаточна, поэтому область их применения ограничена. Их следует рекомендовать для изоляции внутримашинных соединений влагостойких обмоток и обмоток высокого напряжения, а также для обмотки кабелей. Стеклоткань РЭТСАР на основе кремнийорганической самосклеивающейся резины механически прочнее, чем ЛЭТСАР, но имеет более низкую электрическую прочность и хуже утягивается вокруг токоведущих частей.

3.12. Нагревостойкие бумаги и картоны

Для армирования изоляционных материалов, особенно пленочных, создана гамма новых электроизоляционных бумаг и картонов.

Как правило, четко обозначенной границы между обычной бумагой и картоном не существует. Согласно установленному ГОСТу, бумагой считается материал, который в основном состоит из растительных волокон, которые связаны между собой силами поверхностного сцепления с массой до 250 г на 1^2мВ данном материале могут содержаться различные минеральные наполнители, проклеивающие вещества, красители, пигменты, а также как натуральные,

так и химические волокна. Картон же определяется как материал, который, как и бумага, состоит преимущественно из растительных волокон, только отличается от нее более высокими показателями толщины и массы на квадратный метр. В соответствии с немецкой классификацией, картон — это бумага, масса которой превышает 150 г на 1 м^2. По мнению большинства специалистов, картоном можно считать практически любую многослойную бумагу или же бумагу, толщина которой свыше 0,2 мм.

Так как большинство из них (например, полиэфирная) не имеет самостоятельного применения, а используется лишь в композиционных материалах или для предпрегов, то в данном параграфе приводятся свойства только картонов и бумаг из волокон ароматического полиамида «Номекс» (фирмы «Дзюпон»), имеющих самостоятельное применение. Картоны и бумаги «Номекс» обладают исключительными электроизоляционными и механическими свойствами, их можно использовать в качестве основной изоляции без дополнительного армирования и усиления электрически более прочными материалами при рабочей температуре 220 °С и для длительной работы в атмосфере 98-процентной относительной влажности. Эти материалы выпускают двух типов: каландрированные «Номекс-410» и «Номекс-414» и некаландрированные «Номекс-411», отличающиеся плотностью, гладкостью поверхности и способностью впитывать лаки. Материал «Номекс-411» в основном применяют для композиционных материалов на основе синтетических пленок (главным образом для междуфазной изоляции). «Номекс-410» используют как в качестве основной изоляции, так и в качестве подложек композиционных материалов (в основном для пазовой изоляции и пазовых крышек). На рис. 79 и в табл. 42 приведены результаты испытаний электрокартонов «Номекс-410», из которых видно, что электрическая прочность этих картонов практически не снижается после их перегиба на 180 °С через оправку равной толщины и прокатки валиком силой 20 Н, а также после пребывания в течение 21 сут в атмосфере 98-процентной относительной влажности при 20 °С.

В продольном направлении сопротивление надрывающим усилиям картона «Номекс» такое же, как и пленкоэлектрокартона с пленкой мелинекс. Исследования показали, что система пазовой изоляции на основе картона «Номекс-410» толщиной 0,25 мм

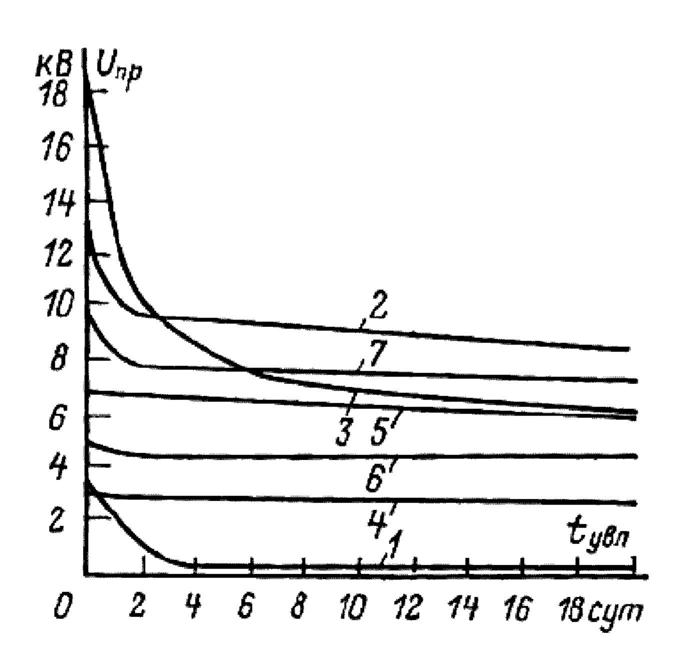


Рис. 79. Зависимость пробивного напряжения материалов от времени пребывания в атмосфере 95–98-процентной относительной влажности: 1 — электрокартон ЭВ толщиной 0,2 мм; 2 — лакостекломиканит ГФП-Т-ЛСП, 0,45 мм; 3 — лакостеклослюдопласт ГИТ-Т-ЛСБ, 0,45 мм; 4 — «Номекс Т-410», 0,128 мм; 5 — «Номекс Т-410», 0,256 мм; 6 — гибкий миканит ГФС, 0,2 мм; 7 — пленкоэлектрокартон, 0,27 мм

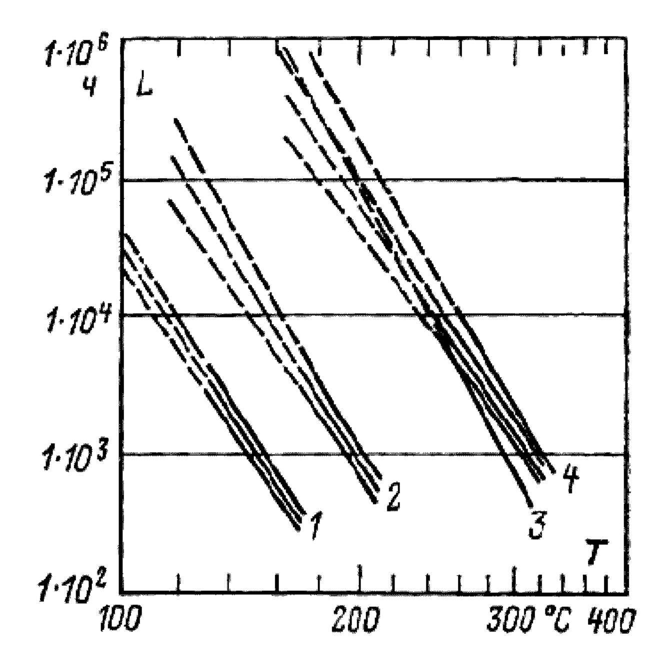


Рис. 80. Зависимость срока службы корпусной изоляции в мотореттах от температуры: 1 — целлюлозный картон, поливинилформалевый провод, пропитанный фенольно-масляным лаком; 2 — полиэфирная стеклолакоткань, полиэфирный эмалированный провод, пропитанный полиэфирным лаком; 3 — стекломиканит на кремнийорганическом лаке, полиимидный эмалированный провод, пропитанный кремнийорганическим лаком; 4 — то же, но стекломиканит заменен бумагой «Номекс»

Таблица 42

Свойства картонов типа «Номекс» и других материалов, применяемых для пазовой изоляции

Материал	Толщина, мм	Пробивное напряжение, кВ						Сопротивление надрыву, Н, в направлении				Число двойных перегибов	
		в состоянии поставки		После перегиба — прокатки валиком силой 20 Н				продольном		поперечном			
				вдоль рулона		поперек рулона							
		среднее	минимальное	среднее	минимальное	среднее	минимальное	среднее	минимальное	среднее	минимальное	среднее	минимальное
«Номекс»	0,14	2,9	2,6	2,7	2,2	2,7	2,3	262	255	49	39	—	—
	0,26	6,2	5,8	5,6	4,9	5,4	4,5	323	265	84	67	3920	2515
Электрокартон ЭВ	0,2	3,3	3,2	2,9	2,4	2,5	1,2	46	40	58	55	2178	252
Гибкий стеклослюдопласт ГИТ-Т-ЛСБ	0,51	15,5	11,0	12,3	7,0	12,3	7,0	530	450	690	650	—	—
Пленкоэлектрокартон	0,28	12,4	11,5	12,4	11,0	—	—	357	345	385	370	—	—
Пленкосинтокартон ПСК-Л	0,19	16,0	14,0	14,7	13,0	16,0	13,0	550	530	580	520	—	—
Пленкосинтокартон NMN (Япония)	0,20	12,0	11,0	12,3	10,0	12,0	11,0	680	500	660	620	—	—

с витковой изоляцией провода марки ПСДК и при пропитке лаком КО-916к имеет нагревостойкость 200–220 °С. Такие же результаты для картона «Номекс» получены фирмой «Дюпон» (рис. 80) при испытании в мотореттах. В зависимости от толщины электрокартоны на основе ароматических полиамидов могут применяться для выкладки пазов и пазовых крышек (толщина картона должна быть не более 0,25 мм), гильзовой изоляции роторных стержней (тол-

щина не более 0,15 мм). Короностойкость картона «Номекс-410» невысокая (рис. 81). Рекомендуемые фирмой «Дюпон» условие применения картона «Номекс» для пазовой изоляции статоров с высотой центров от 56 до 315 мм приведено в табл. 43.

Механическая прочность картона «Номекс» приведена на рис. 82. Картон «Номекс» обладает очень высокой химо- и фреоностойкостью (табл. 44).

Для армирования пленочных материалов применяют бумаги на основе полиэфирных волокон дакрон. Фирмой «Вилен» (Япония) разработаны нетканые материалы на основе полиэфирных или ароматических полиамидных полимеров без применения связующих. Эти материалы также не имеют самостоятельного значения, их используют в качестве подложек для микалент, композиционных материалов и др.

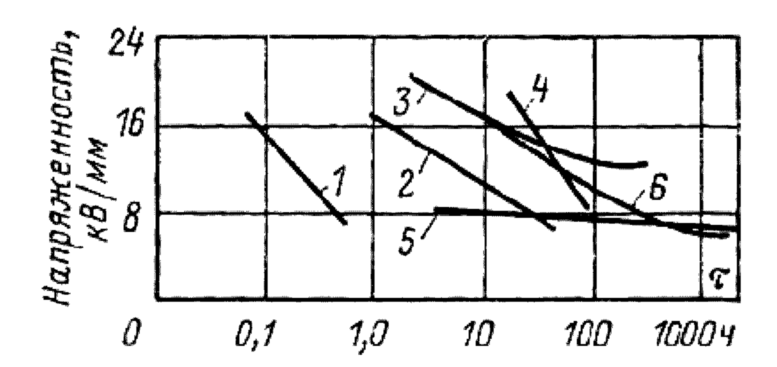


Рис. 81. Короностойкость различных электроизоляционных материалов (ASTM 2275): 1 — электрокартон; 2 — полиэфирная пленка и полиэфирный электрокартон, склеенные эпоксидной смолой; 3 — стекломиканит; 4 — полиэфирная пленка; 5 — асбестовая бумага; 6 — картон «Номекс»

Таблица 43

Рекомендуемые типы и толщины изоляции «Номекс», мм

Высота центра	Изоляция паза «Номекс Т410»	Крышка (клин) «Номекс Т410»	Междуфазная изоляция
56–112	0,25	0,30	«Номекс Т411», 0,20
132–200	0,30	0,38	«Номекс Т411», 0,30
225–250	0,38	0,51	«Номекс Т411», 0,51
280–315	0,51	0,51	«Номекс Т410», 0,51

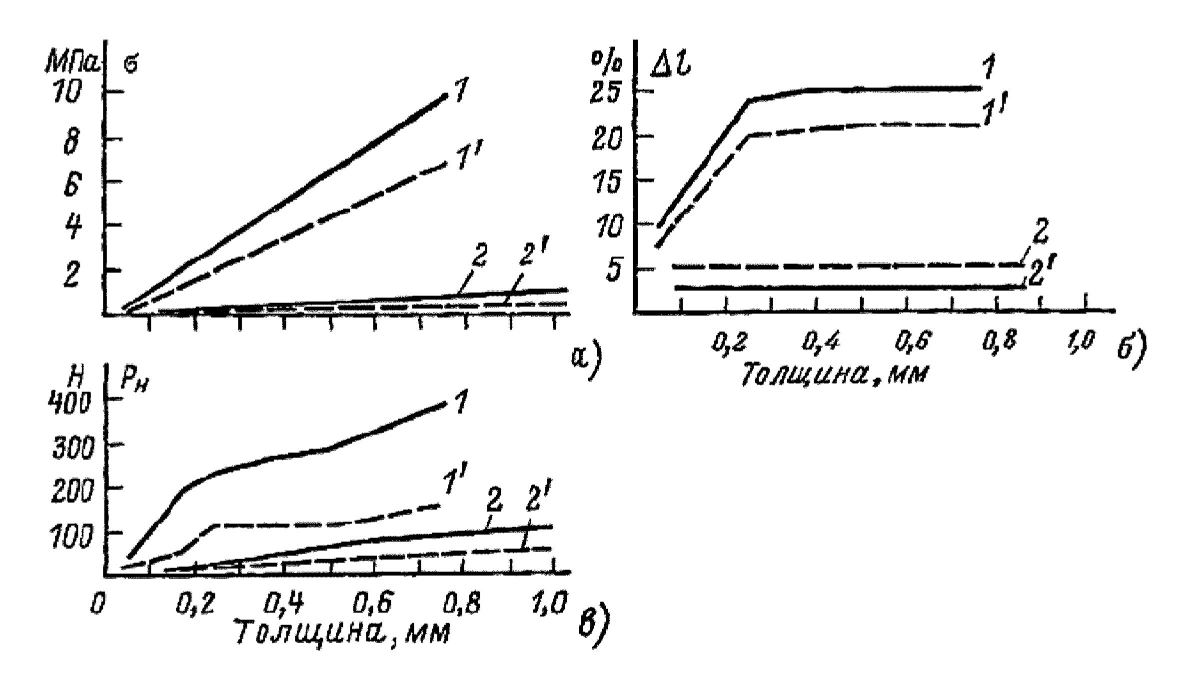


Рис. 82. Зависимость прочности на разрыв σ (а), относительного удлинения Δl при разрыве (б) и сопротивления надрыву Рн (в) картонов «Номекс-410» (1, 1') и «Номекс-411» (2, 2'): 1, 2 — вдоль рулона (листа); 1', 2' — поперек

Таблица 44

химостойкость изоляции

Среда	Температура, °С	Время выдержки, ч	Прочность на разрыв по отношению к исходной, %
70 % H_2SO_4	21	100	100
70 % H_2SO_4	95	8	50
70 % HNO_3	21	100	50
10 % NaOH	21	100	100
10 % NaOH	95	8	50
Фреон-12 и фреон-22	25	150	100
Фреон-12	150	150	80
Аскарели	200	13	100

3.13. Композиционные материалы на основе синтетических пленок

Так как пленочные материалы большой толщины очень жестки и дорого стоят, особенно полиамидная пленка, то для улучшения технологических свойств (разработки материалов с различной жесткостью для машинной укладки пазовой изоляции, для междуфазной изоляции и пазовых крышек) создана гамма композиционных материалов, состоящих из сочетаний пленок с бумагами, стеклотканями или с матами на основе нагревостойких волокон. Сначала были разработаны пленкоэлектрокартоны на основе целлюлозных картонов и триацетатных или лавсановых пленок. В конструкциях они не обеспечивают надежного класса нагревостойкости Е, а по другим параметрам (например, по сопротивлению надрыву) уступают композиционным материалам на основе синтетических бумаг, поэтому производство их постепенно уменьшается. Нагревостойкость композиционных материалов определяется нагревостойкостью как пленки, так и подложек и клеящих лаков. Технологичность их (жесткость) зависит от толщины примененных пленок и подложек и от отношения их толщин. Сопротивление надрыву и пробивное напряжение определяются в первую очередь толщиной пленки. Пленкосинтокартоны хорошо выдерживают фальцевание. Так как синтетические пленки влагостойки, то и пленкосинтокартоны влагостойки. Их влагостойкость особенно повышается при использовании в качестве подложек бумаги «Номекс». Применение для этой цели асбестовой бумаги снижает влагостойкость композиционного материала. Так как полиэтилентерефталатные пленки обладают механическими и электрическими свойствами и сравнительно дешевы, их чаще, чем другие пленки, применяют в композиционных материалах, двухслойных, но чаще трехслойных с пленкой внутри. Это пленкосинтокартоны ПСК-Л и ПСК-ЛП (в непропитанном и пропитанном виде), которые выпускаются толщиной 0,26 и 0,37 мм в зависимости от толщины пленки. Нагревостойкость этих пленкокартонов — класса В. В качестве подложки применяется бумага из полиэфирных волокон. За рубежом выпускаются аналогичные материалы: «Миофлекс Р» фирмы «Изола» (Швейцария), «Вольтафлекс» фирмы «Изовольта» (Австрия), «Тривольтерм Р» фирмы

«Кремпель» (Германия), FTF фирмы «Нитто» (Япония). Толщина их варьируется от 0,15 до 0,65 мм и зависит от толщины как пленок, так и подложек. Некоторые фирмы («Нитто», «Изола» и др.) относят их к классу нагревостойкости F, но, как показали исследования (рис. 83), эти материалы имеют нагревостойкость не выше класса В. К классу нагревостойкости F относятся пленкосинтокартоны на основе полиэтилентерефталатной пленки и бумаги из ароматического полиамида («Номекс») или фенилоновой. Их свойства приведены в табл. 45. Так как эти бумаги дороги, то толщина материала варьируется толщиной пленок. Пленкосинтокартон на основе фениловой бумаги и пленки ПМ имеет марку ПСК-Ф.

За рубежом выпускают материалы на основе «Номекса» и полиэфирных пленок следующих марок: «Миофлекс» (фирма «Изола»), «Изоном NMN» (фирма «Изовольта», Австрия), «Тривольтерм N» и «Фазотерм» (фирма «Кремпель»), «Трифлексиль NMN» (фирма «Пукаро», Германия), NTN (фирма «Нитто»). Толщина материалов варьируется от 0,20 до 0,48 мм. Для изделий класса нагревостойкости Н изготовляют пленкосинтокартоны на основе «Номекса» и полиимидной пленки «Кэптон» дорога, обычно применяют пленки

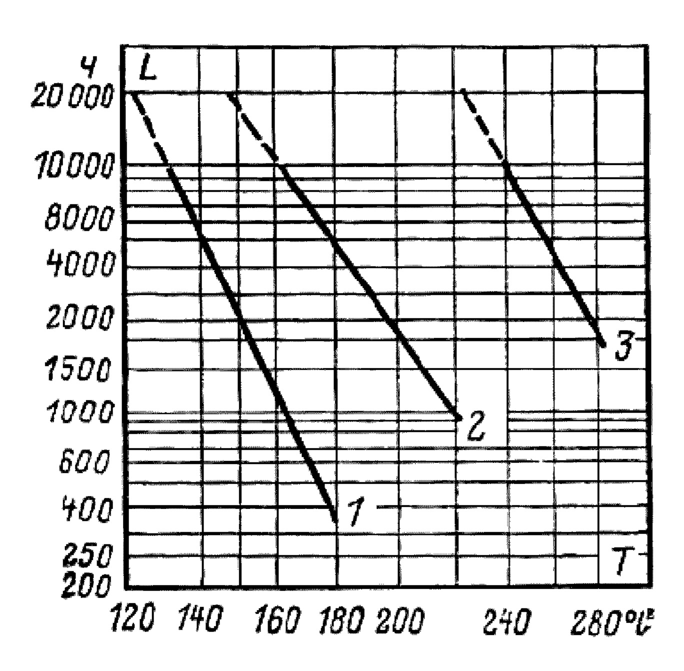


Рис. 83. Нагревостойкость материала на основе бумаг и синтетических пленок: 1 — сочетание полиэфирной бумаги с полиэфирной пленкой; 2 — сочетание бумаги «Номекс» с полиэфирной пленкой; 3 — бумага «Номекс»

Таблица 45

Сравнительные свойства бумаги «Номекс-410», полиэфирной пленки и пленкосинтокартонов (толщина материалов 0,25 мм; для NMN применена пленка толщиной 0,075 мм, для DMD — толщиной 0,125 мм)

Свойство	«Номекс-410»		NMN		DMD		PETF	
	вдоль	поперек	вдоль	поперек	вдоль	поперек	вдоль	поперек
Сопротивление разрыву, Н/15 мм	355	225	375	325	310	330	680	640
Относительное удлинение, %	15	15	19	29	25	64	145	121
Сопротивление надрыву, Н	170	130	250	400	330	380	475	500
Электрическая прочность в криволинейном электроде, МВ/м	39,2	—	60	—	55	—	104	—

толщиной 0,025, реже 0,05 мм. Толщина материала определяется толщиной бумаги «Номекс». Эти материалы имеют механические свойства, близкие к свойствам материалов на основе бумаги «Номекс» и полиэфирной пленки, но более химостойки и относятся к классу нагревостойкости Н. Пленки «Изоном NKN» на основе бумаги «Номекс 411» и пленки «Кэптон» и «Изоном NKN» на основе бумаги «Номекс 410» и пленки «Кэптон» выпускаются толщиной 0,20 и 0,22 мм. Такие же материалы на основе бумаги «Номекс 410» под названием «Тривольтерм NKN» изготовляют толщиной 0,20–0,35 мм (фирмы «Кремпель», «Пуаро»). Композиционные материалы на основе полиэтилентерефталатных пленок и асбестовых бумаг, стекломатов и стеклоткани — «Миасбест», «Миофер» (фирма «Изола»), «Вольтафлекс АМА» и «Вольтафлекс GMG» (фирма «Изовольта»), АТ53 (фирма «Нитто») — менее упруги, чем материалы на основе целлюлозных и синтетических бумаг, менее влагостойки, и не во всех случаях их можно использовать для пазовой изоляции. Для пазовых крышек их применять нельзя. Эти материалыфирмы относят обычно к классу нагревостойкости F. Наиболее распространены пленкосинтокартоны на основе полиэтилентерефталатных пленок и полиэфирной или полиамидной бумаги.

3.14. Совместимость гибких электроизоляционных материалов с пропиточными составами

Для гибких электроизоляционных материалов, как и для изоляции обмоточных проводов, первым условием совместимости является стойкость к пропиточным составам. В этом отношении следует осмотрительно применять такие стеклолакоткани, как латексная ЛСЛ, эскапоновая ЛСЭ и особенно кремнийорганическая ЛСК, лаковые пленки, которых могут растворяться пропиточными составами. Снижение растворимости лаковых пленок изоляции может быть достигнуто соответствующей термообработкой перед пропиткой. Такая термообработка целесообразна и для изоляции, выполненной из гибких миканитов, стекломиканитов и микалент, во избежание частичного растворения содержащихся в них лаков при пропитке. Нельзя применять водоэмульсионные лаки при изоляции на основе слюдинитов и слюдопластов. Слюдяные бумаги разрушаются водой. Нельзя также использовать водоэмульсионные лаки для пропитки изоляции на основе миканитов, склеенных глифталевым или кремнийорганическими лаками, т. к. в результате реакции воды с лаками снижается влагостойкость изоляциидаже после ее запекания. При правильно подобранных лаках и режимах пропитки и сушки нагревостойкость изоляции на основе гибких материалов будет тем выше, чем выше нагревостойкость пропиточных сотавов. При выборе нового материала следует ориентироваться не столько на его нагревостойкость, сколько на срок службы пропитанной системы изоляции. Поэтому в ряде случаев можно получить больший срок службы системы, применяя менее нагревостойкие, но более технологичные менее повреждающиеся при изготовлении изоляции изоляционные материалы и лаки более высокой нагревостойкости, чем в случае использования высоконагревостойких, но менее гибких материалов и лаков примерно такой же нагревостойкости.

3.15. Гибкие электроизоляционные трубки

В электрических машинах для изолирования внутримашинных соединений и выводных кабелей применяются гибкие изоляционные трубки. Основное свойство этих трубок — гибкость — позво-

ляет использовать их в изогнутых элементах конструкций, чем значительно снижается трудоемкость изоляционно-обмоточных работ за счет отмены операций изолирования лентами. Трубки практически делятся на две группы — лакированные и получающиеся путем экструзии соответствующих пластиков или каучуков. Лакированные трубки на основе хлопчатобумажной пряжи — линоксиновые (марки ТЛВ) давно применяются в электромашиностроении, позже разработаны и внедрены стеклолакотрубки, пропитанные лаками различной нагревостойкости. Широко используемые поливинилхлоридные трубки марки ТВ (рис. 84) обладают рядом превосходных технологических свойств — упругостью, эластичностью, высокой электрической и механической прочностью, тропико- и химостойкостью, но в связи с низкой нагревостойкостью разрушаются при пропитке и сушке обмоток. Применение поливинилхлоридных трубок для изолирования внутримашинных соединений даже в электрических машинах с нагревостойкостью класса А недопустимо не только из-за низкой нагревостойкости поливинилхлоридного пластика (90 °С), но и из-за того, что выделяющийся в процессе старения хлористый водород вызывает ускоренное старение изоляции и проводов, расположенных около трубок. Трубки из поливинилхлоридного пластиката марки ТВ-40 применяются для защиты и дополнительной изоляции проводов и кабелей, работающих при напряжении до 1000 В постоянного и переменного тока частотой 50 Гц.



Рис. 84. Трубки из поливинилхлоридного пластиката ТВ-40 ГОСТ 19034-82

Поэтому их использование должно быть ограничено — только для изолирования места припайки кабельного наконечника к выводному проводу, где, как правило, температура не превышает 90 °С. Лакированные трубки на основе хлопчатобумажных и стеклянных чулков при некотором различии в нагревостойкости, оцениваемой по химическому составу применяемых чулков и лаков, имеют один общий недостаток — лаковые пленки трубок легко разрушаются в процессе изготовления обмоток (незначительная стойкость к перегибам). В изогнутом состоянии (а это обычное состояние трубок в электрических машинах) они имеют малые сроки службы, т. к. быстро старятся вследствие развития образовавшихся в процессе изготовления обмоток дефектов в лаковых пленках (табл. 46.1), которые в некоторых марках трубок выявляются уже при изготовлении обмоток. Поэтому при изолировании внутримашинных соединений статорных обмоток трубками ТЛС и ТКС во время испытаний обмоток в соответствии с нормами повышенным напряжением наблюдаются массовые пробои трубок. В местах, где трубки не подвергаются изгибам, кручению и сжатию (при увязке схемы), лакированные трубки могут применяться: марок ТЛВ (на основе хлопчатобумажного чулка и масляного лака) и ТЛС (на ос-

Таблица 46.1

Нагревостойкость изоляционных трубок в изогнутом состоянии

Трубки	Марка	Средний срок службы, ч, при температуре, °С			
		125	150	170	190
Поливинилхлоридные	ТВ	1856	429	24	—
Линоксиновые	ТЛВ	470	136	24	—
Стеклолакочулок	ТЛС	—	336	84	24
Стеклолакочулок	ТКС	—	—	—	1205
Облученный полиэтилен	ТТЭ-Т	—	6151	1167	537
Кремнийорганические	ТКР	—	—	—	—
Фторкаучуковые	ТРФ	—	—	—	27888
Кремнийорганические	ТКСП	—	—	—	—
Полиолефиновые (фирма «Нитто»)	NSTN-140	11710	4043	2064	—
	NST-150	8520	3926	1376	—
	NST-151	11841	3911	1296	—
	NST-610	11622	1846	1347	—

нове стеклянного чулка и масляного лака) — для машин с изоляцией класса нагревостойкости А для работы в нормальных условиях окружающей среды, марки ТЭС (на основе стеклочулка и полиэфирно-эпоксидного лака) — для машин класса нагревостойкости В исполнения У; марки ТКС (на основе стеклочулка и кремнийорганического лака) — для машин с нагревостойкостью классов F и Н исполнений У и химически стойкого.

Электроизоляционные трубки марки ТЛВ, ТЛМ (рис. 85) представляют собой пропитанные электроизоляционным лаком хлопчатобумажные шнур-чулки. Трубки применяются для изоляции проводов электротехнических и радиотехнических изделий, работающих при постоянном и переменном напряжении до 660 В частоты 50 ГЦ. Температурный диапазон использования трубок от –50 до +105 °С. Маслостойкие: трубки изготавливаются диаметром от 0,75 мм до 11. 0 мм длиной 1000 мм. Трубки электроизоляционные гибкие марки ТКР изготавливаются из высококачественной кремнийорганической (силиконовой) резины. Используются для изоляции выводных и монтажных проводов электрооборудования, токоведущих элементов электротехнических устройств и радиоаппаратуры, пучков изолированных проводов, концевой заделки и ремонта высоковольтных кабелей, работающих при постоянном и переменном напряжении до 1000 В, частотой до 500 Гц. Класс нагревостойкости: 200 по ГОСТ 8865-93.

После пропитки лаками и сушки обмоток трубки обычно становятся очень хрупкими; трубки ТЛВ и ТЛС, особенно ТКС, не стойки к растворителям лаков. Поэтому стеклолакочулки заменяют эластомерными трубками, полученными путем экструзии нагревостойких



Рис. 85. Электроизоляционные трубки марки ТЛВ, ТЛМ ТУ 16-89

резин и пластикатов. Большое распространение получили трубки на основе кремнийорганических резин благодаря их высокой нагрево-, влаго-, химо- и тропикостойкости. Их выпускают армированными (марки ТКСП) и неармированными (марки ТКР). Армированные трубки более стойки к прокалыванию.

Трубки электроизоляционные гибкие марки ТКР (рис. 86) изготавливаются из высококачественной кремнийорганической (силиконовой) резины. Используются для изоляции выводных и монтажных проводов электрооборудования, токоведущих элементов электротехнических устройств и радиоаппаратуры, пучков изолированных проводов, концевой заделки и ремонта высоковольтных кабелей, работающих при постоянном и переменном напряжении до 1000 В, частотой до 500 Гц.

Трубки ТКР и ТКСП весьма эластичны и полностью сохраняют свою электрическую прочность при изгибании и кручении, в отличие от лакочулков влагостойкости, имеют класс нагревостойкости Н (табл. 46.2).

Еще более упруги при сохранении эластичности и стойкости к перегибам трубки марки ТРФ на основе фторорганической резины. Эти трубки в отличие от трубок ТКР и ТКСП значительно более стойки к растворителям и более химостойки. В табл. 47 приведены фактические свойства трубок из пластикатов в сравнении с лакированными трубками.

В табл. 47 показаны результаты определения стойкости трубок к пропиточным лакам. Трубки ТКР и ТРФ трехкратно по 1 ч про-



Рис. 86. Трубки электроизоляционные гибкие марки ТКР соответствуют нормам ГОСТ 17675-87

Таблица 46.2

Нагревостойкость изоляционных трубок в изогнутом состоянии

Трубки	Марка	Средний срок службы, ч, при температуре, °C				$ТИ_{20000}$, °C
		210	230	250	280	
Поливинилхлоридные	ТВ	—	—	—	—	110
Линоксиновые	ТЛВ	—	—	—	—	78
Стеклолакочулок	ТЛС	—	—	—	—	100
Стеклолакочулок	ТКС	505	—	72	—	149
Облученный полиэтилен	ТТЭ-Т	—	—	—	—	133
Кремнийорганические	ТКР	32592	9960	554	—	220
Фторкаучуковые	ТРФ	21048	3510	—	—	200
Кремнийорганические	ТКСП	25872	—	2064	60	210
Полиолефиновые (фирма «Нитто»)	NSTN-140	—	—	—	—	112
	NST-150	—	—	—	—	118
	NST-151	—	—	—	—	116
	NST-610	—	—	—	—	117

Таблица 47

Изменение свойств трубок при пропитке лаками

Обработка поверхности трубок перед сушкой	Время сушки, ч	ТЛВ		ПВ		ТРФ, ТКР, ТКСП	
		непропитанные	пропитанные лаком МЛ-92	непропитанные	пропитанные лаком МЛ-92	непропитанные	пропитанные лаком КО-916к
Отсутствие смывки и смазки	16	О	—	О	—	Э	Э
	32	Л	—	Ж	—	Э	Э
	48	Л	Л	Л	Л	Э	Э
Смывка и смазка вазелиновым маслом	16	Э	Э	Э	Э	—	—
	32	Л	Л	Д	Д	—	—
	48	Л	Л	Д	Д	—	—

Условные обозначения: Э – эластичная; О – ограниченно эластичная; Д – допустимо жесткая; Ж – жесткая; Л – ломкая.

питывали лаком КО-916к и после каждой пропитки сушили по 16 ч при 210°С. Линоксиновые и поливинилхлоридные трубки трижды пропитывали лаком МЛ-92 (по 30 мин) и после каждой пропитки сушили по 16 ч при 125°С. Параллельно сушили трубки, не подвергавшиеся пропитке. Эластичность трубок проверяли навиванием их на стержень диаметром, равным трем диаметрам трубки, и визуально определяли наличие трещин. Для трубок ТКР и ТРФ были применены более жесткие условия — перегиб на 180°. Степень снижения эластичности трубок оценивали баллами. Трубки марки ТКР не вполне упруги и недостаточно стойки к прокалыванию. Поэтому при их применении следует перед надеванием трубки выпрямить провод и трубку надевать без нажима. Лобовые части обмотки должны быть отбиты по шаблону, вставленному внутрь пакета до соединения обмоток в схему и надевания на них трубок. Места паек должны быть изолированы лентами или защищены.

Термоусаживающиеся трубки ТУТ применяются для ремонта испорченной изоляции и покрытия проводов, изоляции и герметизации мест пайки разъемов электрических кабелей и кабелей связи, изоляции соединений проводов и их ожгутовки, создания защитного покрытия от механических и химических воздействий, защитного покрытия проводов и деталей с надписями или маркировкой, соединения и ремонта гидравлических трубопроводов, фазировка проводов электрических соединений.

Политетрафторэтиленовые трубки пригодны для работы в диапазонах температур от –60 до +250°С. Они очень стойки к растворителям и химически активным средам. Политетрафторэтилен не горит, обладает очень высокими электрическими параметрами и отличной стойкостью к воздействию плесени и влаги. Материал устойчив к внешним воздействиям, однако в некоторых условиях могут возникнуть трудности, связанные сего хладотекучестью.

Представляют значительный интерес некоторые типы трубок, применяемых зарубежными фирмами (табл. 48).

Поликарбонатные трубки обладают низким влагопоглощением, высокой температурой деформации при нагреве и превосходной стойкостью к ползучести, что обеспечивает стабильность их размеров. Эти трубки имеют хорошие электрические параметры для надежной работы в различных окружающих условиях, высокую на-

Таблица 48

Механические свойства трубок, полученных экструзионным способом

Трубки	Толщина стенок, мм	Сопротивление разрыву, МПа	Относительное удлинение, %	Твердость по Шору	Гибкость, мм
ТКР	1,05	4,2	>540	58	-
	1,14	3,8	460	53	—
	1,34	3,7	460	58	14
	0,64	14,7	340	—	—
ТРФ	0,78	7,4	220	—	21
ПВ	0,68	17,1	424	—	34
Поликарбонатные	—	60,0	80	—	—
Политетрафторэтиленовые	0,5	30,0	300	55	—
Сополимер политетрафторэтилена с гексафторпропиленом (NST-930)	0,5	27,0	300	55	—

гревостойкость и широкий температурный интервал применения; обладают способностью к самогашению, хорошими физико-механическими свойствами и высокой стойкостью к коррозии и окислению. По имеющимся данным их нагревостойкость 135°С; трубки холодостойки (–135°С).

В России получили распространение трубки из облученного термостабилизированного полиэтилена марок ТТЭ-С и ТТЭ-Т, которые так же упруги и стойки к прокалыванию, как поливинилхлоридные трубки, но более нагрево- и холодостойки. Некоторым недостатком ТТЭ-Т является склонность к продавливанию при температуре, близкой к рабочей (130°С). Трубки ТТЭ-Т более нагревостойки (класс В), чем ТТЭ-С (класс А), но теплостойкость их ниже (ТТЭ-С — 160°С). Термоусаживающиеся трубки разных классов нагревостойкости изготовляют на основе полиолефинов (полиэтилен низкого и высокого давления), поливинилденфторида, поливинилхлорида, полихлорпренового, фторидного и полиорганосилоксановых каучуков. Усадочная способность таких трубок при температуре выше 120°С составляет 2–4 раза по диаметру. Продольная усадка

не превышает 5 %. При хранении в течение неограниченного времени трубки не получают усадки. Термоусаживающиеся трубки технологичны и поэтому перспективны. Наиболее широкое применение нашли термоусаживающиеся трубки для изоляции мест оклетневки кабельных наконечников и мест паек.

3.16. Выводные провода

Для выводов электрических машин применяют гибкие провода с каучуковой и ленточной изоляцией. Провода для выводов электродвигателей изготовляют сечением от 0,75 до 120 мм всех классов нагревостойкости от 80 до 180 °С на переменное напряжение от 380 до 6000 В. Провода изготовляют с резиновой изоляцией различных модификаций, а также с изоляцией из кремнийорганической и фторсилоксановой резины, асбестовой ровницы, резино-стеклоткани, фторопласта. Защитными покрытиями проводов служат резиновые оболочки и оплетка стеклонитью, пропитанные нагревостойким лаком и др. Основными требованиями, предъявляемыми к выводам, являются: гибкость, обеспечиваемая применением медных жил из тонких проволок и гибкостью изоляции; высокая электрическая прочность изоляции провода, чем достигается ее небольшая толщина; стойкость к пропиточным составам и температурным воздействиям в процессе сушки после пропитки, которая оценивается степенью сохранения гибкости провода; механическая прочность — в первую очередь стойкость к истиранию и прокалыванию. В машинах с изоляцией класса А для выводов обычно применяют гибкие провода с резиновой (типов ПРГ, ЛПРГС) или поливинилхлоридной (типа УВГ) изоляцией. Последние могут быть применены в машинах тропического и химически стойкого исполнений. Нагревостойкость проводов ПРГ и ЛПРГС низкая (65°С), такую же низкую нагревостойкость имеют провода типа УВГ (70°С). Поэтому, несмотря на отличные технологические свойства и высокую электрическую прочность, эти провода не следует применять даже в машинах класса нагревостойкости А. В последние годы внедрены новые виды проводов марки ПРГБ с изоляцией из бутилкаучука, нагревостойкость которых 90°С. В машинах класса нагревостойкости Е можно применять провода ПВШО (бывшие ЛПЛ-2, ЛПЛ-4,

ЛПЛ-6 и ЛПЛ-8), изолированные лакошелком и хлопчатобумажной оплеткой. Изоляция проводов ПВШО имеет нагревостойкость класса А. К их недостаткам относится невысокая стойкость к пропиткам: они становятся хрупкими вследствие проникновения в них лака, особенно при вакуумной пропитке, и поэтому непригодны при пропитке на установках АВБ. Более стойки к пропиткам провода ПВПО, в которых лакошелк заменен полиэтилентерефталатной пленкой. Зачищаются эти провода хуже, чем провода ПВШО, т. к. пленка труднее отрезается и скользит, а при зачистке в муфельной печи быстро оплавляется. Нагревостойкость проводов марки ПВПО немного выше, чем ПВШО. Нужно отметить, что изоляция проводов ПВШО и ПВПО нехимо- и некороностойка. Поэтому, как показали исследования, даже при увеличении числа слоев с двух (ПВШО-2) до восьми (ПВШО-8) эти провода, несмотря на высокое пробивное напряжение изоляции, можно применять в машинах на рабочее напряжение не более 660 В (табл. 49, 50 и рис. 87).

В связи с тем, что провода марки ПРГБ стойки к химическим реагентам, короностойки и имеют высокие диэлектрические свойства, срок их службы не меньше, чем у проводов ПВШО и ПВПО, что видно из приведенных выше данных. Поэтому, несмотря на то, что бутилкаучук имеет ТИ 90°С, провода ПРГБ можно применять наряду

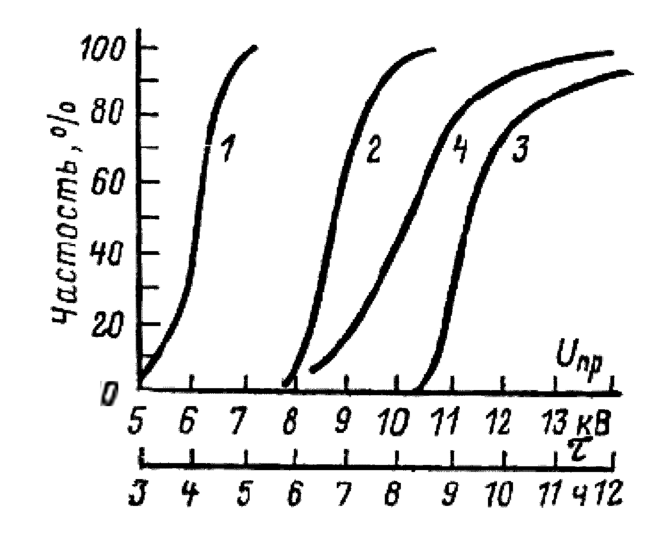


Рис. 87. Результаты длительного электрического старения выводных проводов при частоте 50 Гц, начиная с напряжения 2 кВ, со ступенью повышения напряжения 1 кВ/ч: 1 — ПВПО-2; 2 — ПВПО-4; 3 — ПВПО-8; 4 — ЛПРГС

Таблица 49

Свойства выводных проводов

Провод	Сечение, мм²	Внешний диаметр, мм	Пробивное напряжение, кВ							
			Исходное		После 24 ч пребывания в воде		После 1 ч пребывания в кипящей воде		После 1 ч пребывания в толуоле	
			среднее	минимальное	среднее	минимальное	среднее	минимальное	среднее	минимальное
ПРГ	2,5	4,7	27,0	22,0	18,2	14,0	25,6	20,7	10,8	8,0
ПРГБ	10	7,5	21,6	21,6	9,2	8,0	21,2	17,5	26,0	23,0
РКГМ	10	7,7	24,8	23,0	21,2	12,2	23,6	20,3	—	—
РКГМ	16	9,5	26,2	23,0	23,4	16,0	24,7	21,6	—	—
ПВШО-2	6	4,6	5,2	4,1	3,5	2,3	2,6	1,8	3,9	2,8
ПВПО-2	2,5	3,4	7,2	7,0	5,0	3,5	7,5	6,4	7,3	6,2
ПЭГ-3	16	7,9	6,0	3,0	2,3	1,3	4,9	3,0	—	—
ПАЛ-130	1	4,1	10,8	10,3	10,1	8,5	12,1	10,2	10,8	8,5
ПАЛ-130	1,5	5,0	13,6	10,9	6,3	5,7	12,7	11,5	—	—
ПАЛ-180	1,5	4,8	15,3	9,5	14,3	12,0	14,9	5,4	—	—
ПФР (фторкаучуковые)	2,5	3,9	12,7	11,0	13,0	12,0	13,0	13,0	14,7	13,0
ПВКФ (фторсиликоновые)	10	7,5	14,5	14,0	13,5	12,5	13,8	12,5	13,5	12,5

Таблица 50

Стойкость проводов ПВПО к кратковременно и длительно приложенным напряжениям

Число слоев пленки	Пробивное напряжение, кВ		Срок службы проводов при длительно приложенном напряжении 3000 В частотой 400 Гц, ч	Рекомендуемое рабочее напряжение, В
	среднее	минимальное		
2	10,9	8,6	7,45	250
4	17,3	12,0	34,1	500
6	23,8	17,6	82,7	660

с проводами ПВШО и ПВПО в машинах класса нагревостойкости Е. Провода ПЭГ-3, изолированные тремя слоями стеклолакоткани марки ЛСЭ с пропитанной оплеткой из стекловолокна имеют класс нагревостойкости Е. Однако им присущ ряд недостатков: жесткость, особенно после пропитки (вследствие хрупкости стеклянной оплетки от проникшего под нее пропиточного лака и запеченного), невысокие пробивные напряжения и низкая влагостойкость. Поэтому названные провода не нашли широкого распространения.

Провода РКГМ с изоляцией из кремнийорганической резины, а также ПТЛ-200 и ПТЛ-250 с изоляцией из фторопласта-4 влаго-, нагрево- и холодостойки (РКГМ — класс нагревостойкости Н, ПТЛ-250 и ПТЛ-200 допускают нагрев до 250°С, провода могут работать при температуре минус 60°С). Однако повреждаемость стекловолокнистой оплетки после пропитки делает их нетехнологичными, замена стекловолокнистой оплетки на этих проводах асбестовой или из нагревостойких волокон исключит разрушение оплетки после пропитки. Такими стойкими к воздействию пропиточных лаков являются провода ПАЛ-130 и ПАЛ-180. Провода ПАЛ-130 рассчитаны на рабочую температуру 130°С, ПАЛ-180 — на 180°С, однако испытания показали, что они могут работать при более высоких температурах. Провод ПАЛ-130 изолирован двумя слоями асбестовой ровницы с полиэтилентерафталатной пленкой между ними, ПАЛ-180 — двумя слоями асбестовой ровницы с пленкой из фторопласта-4 между ними. Сверху провода имеют оплетку из асбестовой пряжи, пропитанной лаком ПЭ-942 (ПАЛ-130), К-55 или КО-916к (ПАЛ-180). Они не теряют эластичности после пропиток и сушек. Провода марки ПАЛ имеют более низкое пробивное напряжение, чем провода марки РКГМ, и менее влагостойки (см. табл. 49). Провода ПТЛ-200 и ПТЛ-250, изолированные фторопластовой пленкой, нагревостойки (нагревостойкость 200 и 250°С), влаго- и химостойки, однако стекловолокнистые обмотка и оплетка на их поверхности вследствие пропитки лаком и сушки становятся жесткими и ломаются. На проводах РКГМ была проверена лавсановая оплетка, которая меньше повреждается от пропитки и сушки, чем стекловолокнистая. Однако при лужении жилы выводных концов из проводов РКГМ-Л на оплетку может налипать припой, во избежание чего требуется применять определенные технологические приемы. Испыта-

ния проводов РКГМ с лавсановой оплеткой на срок службы показали, что их успешно можно использовать в электрических машинах с классом нагревостойкости Н. Наиболее стойки к пропиткам и нагревостойкости провода с изоляцией на основе фторорганической или фторсиликоновой резин без оболочек. Такие провода разработаны и внедряются в производство. После трехкратной пропитки лаком КО-916к и сушки при 200–210 °С они полностью сохраняют эластичность. Провода имеют нагревостойкость класса Н, влаго- и химостойки. Пробивные напряжения этих проводов высокие.

Так же серийно изготовляют провода ПСУ-155 и ПСУ-200 нагревостойкостью соответственно 155 и 200 °С, изолированные стеклолакотканью и дельта-асбестом. Они подклеены к жиле кремнийорганическим лаком и пропитаны водно-эмульсионным лаком на основе кремнийорганического лака. Поверх изоляции из стеклоткани допускается наложение скрепляющей обмотки стеклянной нитью. В проводах сечением свыше 25 $мм^2$ допускается изоляция из дельта-асбеста, подклеенного кремнийорганическим лаком и пропитанного водно-эмульсионным лаком на основе кремнийорганического лака.

В выводных проводах класса нагревостойкости Н в качестве изоляции широко применяется кремнийорганическая резина. В проводах ПРКА применяется кремнийорганическая резина повышенной твердости, что обеспечивает механическую прочность изоляции. По требованию заказчика провода могут быть изготовлены с изоляцией белого, зеленого, красного или желтого цвета. Допускается также изготовлять провода в оплетке лавсановой или стеклянной питью, но в этом случае нагревостойкость снижается до 130 °С и внешний диаметр увеличивается соответственно на 0,7 и 0,4 мм.

3.17. Стекловолокнистые бандажные ленты

Создание новых термореактивных лаков, обладающих высокой цементирующей способностью, способствовало разработке однонаправленных нетканых стекловолокнистых лент, применяемых для бандажирования якорей и роторов вместо проволочных бандажей. Основными требованиями, предъявляемыми к таким лентам, называемым стеклобандажными, являются высокая механическая

прочность и способность к спеканию слоев в монолитное кольцо. Стекловолокнистые бандажи изготовляют из нетканой стеклянной ленты, в которой волокна идут только в продольном направлении, пропитанной связующим, находящимся в стадии В (размягчающимся при нагреве). После наложения ленты с необходимым натяжением на ротор или якорь производится ее термообработка, и смола, заполнившая пустоты между слоями бандажа, переходит в стадию С (твердое неплавкое состояние). Бандаж после термообработки становится твердыми упругим и имеет высокие электроизоляционные свойства и механическую прочность. Стеклобандажные ленты имеют разрывную прочность около 800 МПа при 20°С и 550 МПа при рабочей температуре; поверхностное сопротивление бандажа толщиной 0,18, шириной 18,5 мм в исходном состоянии $0,8 \times 10^{14}$ Ом, после 20 сут пребывания в атмосфере 98 % относительной влажности — от $2,8 \times 10^{11}$ до $2,2 \times 10^{13}$ Ом; электрическая прочность стеклобандажной ленты, определенная перпендикулярно ее слоям и поле увлажнения в течение 5 сут (при 98 % относительной влажности), — 14, при рабочей температуре — 11 МВ/м. Как показал опыт эксплуатации, стекловолокнистый бандаж предотвращает перемещение обмотки в роторе или якоре не только в радиальном направлении, но и по окружности ротора или якоря и отдельных элементов обмотки вдоль оси и обеспечивает большую надежность крепления, чем проволочный бандаж. Стекловолокнистые бандажи в якорях и роторах с изоляцией классов нагревостойкости А, Е и В выполняют из нетканых лент, пропитанных лаком ЭП-91-09 (марка ЛСБ-В), в якорях и роторах нагревостойкости F применяется лента, пропитанная лаком ПЭ-933. Стекловолокнистые бандажи длительно сохраняют свою механическую и электрическую прочность в процессе теплового старения, обладают высокой стойкостью к тепловым ударам и холодостойкостью.

3.18. Слоистые пластики, стеклопластики и пластмассы

Для прокладок между катушками, на дно пазов и под клин, для колодок выводов, пазовых клиньев и других деталей до настоящего времени широко используются текстолиты и стеклотекстолиты, представляющие собой твердые материалы, прессованные из слоев

хлопчатобумажных или стеклянных тканей, пропитанных термореактивными связующими. Эти материалы механически прочны, их нагревостойкость зависит от применяемой ткани и связующего.

Материал формируется из хлопчатобумажных тканей посредством горячего прессования с добавлением термореактивных связующих фенолформальдегидной группы. Именно применение тканевой основы обеспечило текстолиту высокую прочность при сжатии, а также ударную вязкость. Основа легко поддается обработке путем сверления, резке и штамповке. Это качество материала обусловило его применение в производстве технологических элементов, которые пребывают под действием электрических и механических нагрузок. При этом существует несколько категорий, на которые разделяются товарные слоистые пластики. Свойства первой категории выражаются в виде повышенной электрической изоляции, что позволяет применять материал и в воздушной среде, и в трансформаторном масле. Вторая категория отличается повышенными механическими качествами, поэтому из пластика этой группы чаще изготавливают детали, на которые оказываются физические нагрузки. Существуют и специальные модификации текстолита, рассчитанные на применение в условиях повышенных температур.

Текстолиты, изготовленные на основе хлопчатобумажных тканей, относятся к классу нагревостойкости А. Нагревостойкость стеклотекстолитов зависит от связующего. В случае применения феноло- или крезолоформальдегидных смол (стеклотекстолиты марок СТ, СТ-1) они имеют нагревостойкость классаВ, полиэфирно-эпоксидных (стеклотекстолиты СТЭФ и СТЭФ-1) — класса F, кремнийорганического связующего — класса Н (стеклотекстолиты СТК и СТВК).

Для получения стеклопластиков стеклянные волокна пропитывают смолой. Стеклянные волокна применяют в виде жгута (штапельные волокна, идущие в одном направлении, иногда предварительно напряженные), ткани (волокна в двух перпендикулярных направлениях, причем в каждом направлении их число различно) и, наконец, в виде холста (с произвольной ориентацией волокон).

Для пропитки используют полиэфирные, мочевиномеламиноформальдегидные и эпоксидные смолы, последние, правда, значительно дороже, но воспринимают намного большее количество наполнителя, обладают иными электрическими свойствами и т. д.

Прочность обычного стеклопластика при растяжении приближается к прочности стали — нагрузку воспринимают стеклянные волокна. Напряжения сжатия воспринимает смола, обладающая относительно высокой прочностью — около 30 % прочности стали. Показатели продольного сжатия, динамической нагрузки и стойкости такой конструкции ниже, поэтому, применяя стеклопластик как конструкционный материал, следует учитывать его свойства.

Для повышения прочности при растяжении стремятся применить максимум стеклянных волокон и минимум смолы; однако каждое волокно должно быть покрыто смолой, непропитанных мест быть не должно. Воздушные пузырьки снижают прочность материала. В связи с этим прочность стеклопластика, полученного под высоким давлением, гораздо выше, чем прочность материала, изготовленного без давления. В обычных условиях можно добиться объемного содержания стеклянных волокон до 50 %. Плотность стекловолокна равна 2,54 т/м^3, смолы — 1,27 т/м^3, т. е. при отношении 50 : 50 плотность стеклопластика равна 1,91 т/м^3. Поскольку плотность стали равна 7,85 т/м^3, стеклопластик той же массы выдержит нагрузку в 4 раза выше, чем сталь.

Стеклопластик обеспечивает герметичность, не корродирует, обладает маслостоикостью, стойкостью против воздействия большинства кислот, щелочей и растворителей.

Стеклотекстолиты различаются видом связующего полимера и маркой стеклоткани или стеклосетки. Стеклоткани могут иметь различную плотность и различный характер переплетения — гарнитуровый, саржевый, сатиновый (рис. 88).

Недостатком текстолитов и стеклотекстолитов является необходимость их механической обработки и лакирования обработанных мест для повышения поверхностного сопротивления во влажной среде. Крупным недостатком стеклотекстолитов является выделение стеклянной пыли при механической обработке, поэтому в последнее время наметилась тенденция к получению готовых деталей из стеклопластиков экструзионным путем при пропускании через фильеры заданной формы и размеров. Наиболее широкое применение получили стеклопластиковые клинья. Их изготовляют на основе стеклонитей и полиэфирной, эпоксидной или полиэфиримидных смол. Класс нагревостойкости зависит от примененных смол: В с за-

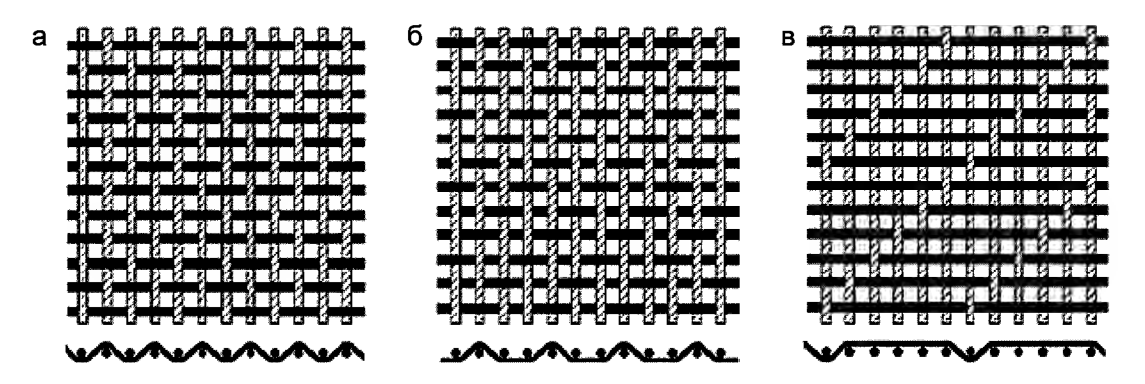


Рис. 88. Типы переплетений: а — гарнитуровое; б — саржевое; в — сатиновое

пасом при полиэфирной и эпоксидной смолах, F — при смоле БИД (табл. 51).

Как показали исследования, стеклопластиковые клинья значительно превосходят по своим свойствам клинья из стеклотекстолита марки СТ. Для сложных деталей, особенно с арматурой, например досок выводов, наиболее производительно применение пластмасс.

Сложные или композиционные пластмассы помимо полимера и добавок содержат минеральные или органические наполнители.

Связующие. В качестве связующего в наполненных пластмассах применяются термореактивные полимеры, т. к. они, по сравнению с термопластичными, менее вязкие и гораздо легче пропитывают наполнители, кроме того, они менее горючи и обеспечивают работоспособность пластмасс при более высоких температурах: полиэфирные — до 100–170 °С; фенольные и фурановые — до 200–250 °С;

Таблица 51

Температурные индексы клиньев по изменению водопоглощаемости (увеличение водопроницаемости в 2 раза)

Материал клина	Время достижения конечной точки, ч, при температуре, °С				$ТИ_{20000}$, °С
	150	170	190	210	
Стеклотекстолит марки СТ	3600	900	720	48	118
Стеклопластик СПП-П	13920	4800	480	240	145
Стеклопластик СПП-Э	11520	1200	360	120	143

полиимидные — до 250–350 °С; кремнийорганические — до 300–500 °С. Формование пластмасс основано на применении легкоплавких или жидких исходных веществ, способных к отверждению. Отверждение фенолоальдегидных связующих основано на поликонденсапионном процессе. Отверждение ненасыщенных полиэфирных олигомеров протекает по механизму радикальной ступенчатой полимеризации и т. п. Наиболее распространены в сложных пластмассах следующие полимеры.

Феноло-формальдегидная смола (ФФС) является важнейшим представителем из группы феноло-альдегидных полимеров, получаемых при поликонденсации фенола или его гомологов (крезола, ксиленола) с формальдегидом или другими альдегидами, например, уксусным или масляным. Аналогичные смолы получают также путем поликонденсации фенола с фурфуролом.

Формальдегид Н–СО–Н — газ, образуется в результате переработки метилового спирта или метана. Раствор формальдегида в воде известен под названием «формалин».

Фенол C_6H_5OH — белое кристаллическое вещество с характерным запахом, выделяется из каменноугольной или из сланцевой смолы; синтезируется из пропилена и бензола.

При поликонденсации фенола или его гомологов с альдегидами могут быть получены смолы двух типов: термопластичные, называемые новолачными, и термореактивные, называемые резольными.

Резолъные (термореактивные) смолы, называемые также бакелитовыми, образуются в щелочной среде при избытке формальдегида и в случае трифункциональных фенолов. В процессе отверждения резольных смол различают три стадии. На начальной стадии (стадия А) смола, называемая резолом (здесь произошло совпадение с общим названием термореактивного полимера), плавится и растворяется в спирте и в ацетоне. В отличие от новолачной смолы, которая тоже термопластична, резол является неустойчивым продуктом поликонденсации и при нагревании постепенно теряет способность плавиться и растворяться (стадия Б, на которой смола получила название резитол), а затем переходит в неплавкое и нерастворимое состояние (стадия С — резит), что является следствием образования сетчатых макромолекул за счет связывания полимерных цепей метиленовыми мостиками.

Новолачные (термопластичные) смолы образуются как на основе трифункциональных, так и бифункциональных фенолов. Смола получается поликонденсацией при избытке фенола и в кислой среде. Макромолекулы новолачной смолы имеют линейную структуру. Новолачная смола, плавкая и растворимая, может быть переведена в нерастворимую и неплавкую форму путем добавления гексаметилентетрамина $(CH_2)_6N_4$ (уротропина) и последующего нагревания. При повышенной температуре в присутствии воды уротропин разлагается на аммиак и формальдегид. Последний реагирует с новолачным олигомером с образованием трехмерной структуры.

Этим свойством пользуются на практике для отверждения новолачной смолы при получении пластмасс.

На основе фенолоформальдегидных смол, смешивая их с наполнителями, красителями, отвердителями, получают конструкционные материалы — фенопласты. Изготовляются также литые изделия без наполнителей (неолейкорит, литой карболит, литой резит и др.), применяемые, главным образом, в галантерее. Спиртовые растворы резольной смолы, называемые бакелитовым лаком, применяют в качестве клея и для антикоррозионной защиты металлов.

Мочевино-формальдегидная (карбамидная) смола (МФС) входит в группу амино-альдегидных полимеров, другим распространенным представителем которой является меламино-формальдегидный полимер — продукт поликонденсации формальдегида с меламином.

Мочевина (карбамид) — кристаллическое вещество, хорошо растворимое в воде, изготовляется из аммиака и углекислого газа, и представляет собой диамид угольной кислоты $H_2N — CO — NH_2$. В реакции с формальдегидом карбамид трифункционален.

Карбамидная смола получается поликонденсацией мочевины и формальдегида обычно в водном растворе. Постепенно удаляя воду, можно получить как вязкие продукты, так и твердые. В зависимости от pH, соотношения компонентов и температуры эти продукты могут быть кристаллическими или аморфными, водорастворимыми или нерастворимыми. Сначала образуются полупродукты — растворимые в воде монометилолмочевина $H_2N–CO–NH–CH_2OH$ и диме-тилолмочевина $HOH_2C–HN–CO–NH–CH_2OH$, водные растворы которых при нагревании дают растворимые олигомеры линейного строения. Отверждение олигомеров осуществляют

в присутствии кислотных катализаторов и при повышении температуры. В результате сшивания линейных цепей образуется твердый, неплавкий и нерастворимый полимер сетчатой структуры.

По физико-химическим свойствам карбамидные полимеры имеют много общего с ФФС, однако отличаются от последних отсутствием цвета и запаха, а также светостойкостью и нетоксичностью.

В производстве пластмасс используются карбамидные олигомеры, как правило, в виде водной эмульсии, т. к. получение сухого продукта связано с большими трудностями из-за высокой его гигроскопичности.

Карбамидная смола применяется также как и ФФС для изготовления прессовочных масс с различными наполнителями. Композиции на ее основе можно окрашивать в любые цвета. Отвержденная карбамидная смола безвредна для человека, поэтому аминопласты часто используют для изготовления пищевой тары.

Полиэфирные смолы. Это название объединяет четыре различные группы сложных гетероцепных полиэфиров: 1) алкидные смолы; 2) волокнообразующие полиэфиры; 3) ненасыщенные полиэфирные смолы; 4) поликарбонаты. В основной цепи всех перечисленных полимеров регулярно повторяются сложноэфирные группы СО–О–.

Ашидные полиэфиры являются наиболее широко распространенным типом пленкообразуюших веществ, составляющим до 70 % объема всей синтетической лакокрасочной продукции. Они применяются также в качестве клеев, заливочных масс, пластификаторов нитратов целлюлозы и поливинилхлорида, для изготовления композиций с каучуком. Из алкидных полиэфиров наиболее известны глифталевые и пентафталевые смолы. Они относятся к сложным полиэфирам, модифицированным растительными маслами (тунговым, льняным, подсолнечным, хлопковым и др.) или жирными кислотами. Например, при двухстадийном жирнокислотном методе сначала при 150–200 °С проводят реакцию между полиатомным спиртом и монокарбоновыми кислотами, в результате которой получают неполные эфиры полиатомных спиртов, а затем при 180–210 °С проводят реакцию неполных эфиров с фталевым ангидридом, приводящую к образованию алкидных олигомеров разветвленного строения. Отверждение алкидов в покрытиях может происходить как за счет дальнейшей поликонденсации разветвленных полиэфи-

ров (при температуре выше 150 °С), так и вследствие окислительной полимеризации радикалов ненасыщенных жирных кислот — модификаторов (при комнатной температуре).

Для досок выводов машин мощностью до 100 кВт с изоляцией классов нагревостойкости А и В общего назначения можно применять фенопласты Э2-330-02, 03-010-02, У4-080-02 и т. п. Для машин мощностью свыше 100 кВт низкого напряжения, где контактах могут развиваться высокие температуры, следует применять жаростойкие пластмассы на основе асбеста или стекла: АГ-4, асбодин, У5-304-1, К-77-51 и т. п. В машинах тропического исполнения следует использовать только пластмассы с неорганическим наполнителем. Для колодок и досок выводов машин с изоляцией классов нагревостойкости В и F и тропического исполнения эффективно применение пластмассы АГ-4, обладающей высокой влагостойкостью, малой усадкой, высокими диэлектрическими свойствами и существенно большей механической прочностью, чем фенопласты. Пресс-масса изготавливается в виде лент (АГ-4СК и АГ-4НС) и «путанки» (АГ-4В). Разрушающее напряжение при изгибе пресс-массы АГ-4В 150, АГ-4С и АГ-4НС 450 МПа. Удельная ударная вязкость пресс-массы АГ-АВ -50, АГ-4С и АГ-4НС — 200 кДж/м^2. Минимальная рабочая температура пресс-массы АГ-4 –196 °С, класс нагревостойкости F. В случае получения деталей из пресс-массы АГ-4 с помощью литьевого прессования механические свойства их существенно снижаются по сравнению с деталями, изготовленными компрессионным прессованием. Выводы машин высокого напряжения изготовляются обычно с применением фарфоровых изоляторов.

3.19. Материалы, выполняющие вспомогательные функции

Для защиты основных электроизоляционных материалов от механических воздействий в процессе изготовления машин и во время их эксплуатации применяются вспомогательные материалы. Наиболее распространенным из них был целлюлозный электрокартон, обладающий хорошими технологическими свойствами, особенно электрокартон марки ЭВ. В тех случаях, когда требуется повышен-

ная эластичность электрокартона, применяют тряпичноцеллюлозные электрокартоны ЭВП и ЭВТ. Электрокартоны в непропитанном состоянии имеют низкие электрическую прочность, влаго- и нагревостойкость. Непропитанный электрокартон относится к классу нагревостойкости Y и для применения в электрической машине нуждается в обязательной пропитке (обычно льняным маслом). Пропитанный электрокартон относится к классу нагревостойкости А. В качестве подложек пропитанный электрокартон может применяться и в машинах с изоляцией классов нагревостойкости Е и В. В машинах тропического и химически стойкого исполнений применение электрокартона и других материалов на основе целлюлозы невлагостойких, нестойких к воздействию химически активных сред и грибковой плесени недопустимо. По технологическим свойствам к электрокартону близок электронит, представляющий собой гибкий листовой материал, состоящий из асбестового волокна (70 %) и синтетического каучука (30 %). Электронит менее упруг, чем электрокартон, поэтому в ряде случаев, когда необходима повышенная упругость вспомогательной изоляции, например для выкладки пазов с большим коэффициентом заполнения, рекомендуется предварительная термообработка электронита при 150–180 °С в течение 1–3 ч. Электронит может быть применен в качестве вспомогательной изоляции в машинах классов нагревостойкости В и F и в машинах химически стойкого исполнения. Недостатком электронита являются неравномерность по толщине и электрической прочности, низкие электрическая прочность и влагостойкость и худшие технологические свойства, чем у электрокартона. Эффективно применение электронита для концевых шайб сердечников статоров, роторов и якорей, т. к. он хорошо штампуется и дает незначительную усадку в процессе старения. В машинах с изоляцией классов нагревостойкости В, F и Н общего назначения, химически стойкого и тропического исполнений в качестве вспомогательной изоляции используют стеклолакоткани. С технологической точки зрения стеклолакоткани не являются полноценными заменителями электрокартона, т. к. не обладают его упругостью, однако при применении их с манжетами пазовая изоляция лучше защищается от надрывов и проколов, чем при использовании менее стойкого к надрывающим усилиям и проколам электронита.

Для механической защиты и закрепления изоляции применяют хлопчатобумажные, лавсановые и стеклянные ленты. Хлопчатобумажные ленты применяют только в машинах класса нагревостойкости А исполнения У и только в пропитанном состоянии. Стеклянные ленты — для машин с изоляцией классов нагревостойкости Е, В, F и Н всех исполнений. Для машин химически стойкого исполнения желательно применение наиболее толстых стеклянных лент — толщиной 0,2 мм. Пропитка стеклянных лент лаками необходима для уменьшения выделения стеклянной пыли при изолировании обмоток. Для увязывания и крепления обмоток используют хлопчатобумажные и стеклянные шнуры. В настоящее время используются лавсановые ленты. Эти ленты механически прочнее хлопчатобумажных и стеклянных (табл. 52) и успешно заменяют не только их, но и шнуры.

Большим преимуществом является усадка лавсановых лент после термообработки (табл. 53), что создает самоопрессовывание изоляции.

Таблица 52

Характеристика лент

Ширина ленты, мм	Ленты хлопчатобумажные			Стеклоленты марки ЛЭС	Лавсановые тафтяные ленты
	тафтяная	миткалевая	киперная		
20	160	190	260	250	390
25	180	230	320	300	390
30	210	270	370	420	450

Таблица 53

Величина усадки разных типов лент

Лента	Ширина, мм	Усадка, %, при температуре, °С			
		125	150	170	190
Тафтяная	20	1,0	5,0	7,0	7,3
	25	2,2	5,0	6,8	8,0
	30	2,2	5,3	7,0	9,0
Миткалевая	20	1,0	4,0	5,5	7,5
	25	1,5	4,5	5,6	7,0
	30	1,4	—	6,0	6,5

Таблица 54

Ассортимент лавсановых лент

Лента	Ширина, мм	Толщина, мм	Разрывная нагрузка, Н, не менее	Удлинение при разрыве, %, не менее
Миткалевая	16	0,14±0,02	200	20
	20		300	
	25		370	
	30		450	
Батистовая	16	0,15±0,02	190	20
	20		200	
	12		80	
Тафтяная	20	0,16±0,02	390	20
	25		390	
	30		450	

Лавсановые ленты влагостойки, и их можно применять для машин в исполнении Т. Лавсановые ленты можно использовать для обмоток с изоляцией класса Н, т. к. в непропитанном состоянии и будучи пропитанными лаком КО-916к, лавсановые ленты, нанесенные на кольцевые макеты, сохраняли свою целостность после 20 000 ч старения при 190°С. Толщина и ширина выпускаемых лент приведены в табл. 54.

Замена ими стеклянных лент приводит к значительному улучшению санитарных условий труда. Лавсановые ленты не требуют пропитки. Для клиньев и дистанционных колодок машин класса нагревостойкости А обычно применяют твердую древесину (бук, березу), пропитанную льняным маслом. Пропитка деревянных деталей необходима для сохранения их размеров в процессе эксплуатации машины, повышения нагревостойкости (пропитанные клинья имеют класс нагревостойкости А, непропитанные — Y) и влагостойкости.

4. конСТрУкции изоляции ЭлекТричеСких машин

Стоимость изоляции в электрических машинах составляет 50–80 % стоимости всех других ее материалов. Поэтому к изоляции вращающихся машин предъявляются очень высокие требования в отношении надежности и сроков службы. Активные материалы, т. е. медь обмотки и сталь статора или якоря работают в электрических машинах при больших удельных нагрузках (плотностях токов и индукциях). Соответственно потери мощности в единице объема этих материалов получаются высокими и для эффективного отвода выделяющегося тепла требуются большие перепады температур активных частей над температурой охлаждающей среды. Поскольку тепло от меди отводится через изоляцию, то она должна обладать высокой теплопроводностью и выдерживать высокую температуру. В связи со сказанным во вращающихся машинах используют изоляцию классов B (130°C), F (155°C) и H (180°C).

В электрических машинах изоляция работает в условиях постоянной вибрации, особенно сильных на лобовых частях обмотки. Кроме того, она периодически подвергается ударным механическим воздействиям, возникающим при прохождении по обмотке больших токов при пусках и торможениях машин, а также при набросе и сбросе нагрузки. Неравномерный нагрев отдельных частей обмотки в переходных режимах также приводит к деформации изоляции. Наиболее опасные механические напряжения возникают на участках выхода обмотки из пазов. Основное требование к изоляции электрических машин — в пределах требуемого ресурса противостоять указанному выше комплексу эксплуатационных воздействий.

4.1. Основные принципы конструирования изоляции обмоток

Технико-экономические показатели машин в большой степени определяются свойствами и качеством примененных электроизоляционных материалов, конструкцией и технологией изготовления обмоток. При расчете и конструировании электрической машины важно выбрать такие конструкцию обмоток и изоляционные материалы, которые обеспечат при минимальной толщине изоляции ее высокую механическую и электрическую прочность, минимальную повреждаемость в процессе изготовления и укладки обмоток, а также во время эксплуатации машин. Для этой цели должны применяться высококачественные тонкие электроизоляционные материалы с высокими нагрево- и влагостойкостью, электрической и механической прочностью, что позволяет улучшить использование активных и конструктивных материалов и в сочетании с другими мероприятиями существенно уменьшить габариты и массу электрических машин при одновременном обеспечении их высокой эксплуатационной надежности.

Количественная зависимость между уменьшением толщины изоляции и повышением мощности машины или уменьшением ее массы установлена при рассмотрении взаимосвязи между степенью заполнения паза медью, толщиной корпусной изоляции, формой сечения и толщиной изоляции провода и размерами клина, включая прокладки.

Коэффициент заполнения паза определяется выражением:

$$f_{м.п.к} = \frac{q_м S_п}{Q_п}; \qquad (4.1)$$

где $q_м$ — сечение активной меди провода, $мм^2$; $S_п$ — число проводников в пазу; $Q_п$ — сечение паза в свету, $мм^2$

или:

$$f_{м.п.к} = f_м \cdot f_п \cdot f_к, \qquad (4.2)$$

где $f_м$ — коэффициент заполнения медью прямоугольника или квадрата, описанного около изолированного провода (рис. 89); $f_п$ — коэффициент заполнения прямоугольников, описанных около изо-

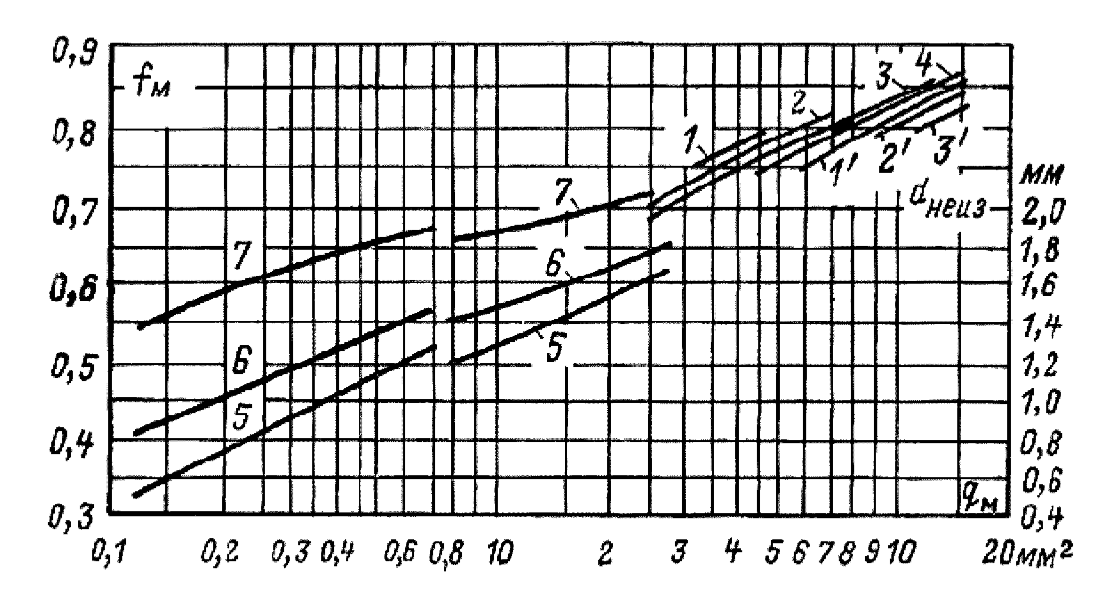


Рис. 89. Коэффициент заполнения изолированных проводов медью: 1, 1' — прямоугольный провод марки ПБД при b/a=1; 2, 2' — то же при b/a=2; 3, 3' — то же при b/a=3; 4 — то же при b/a=5; 5 — круглый провод ПБД; 6 — круглый провод ПЭЛБО; 7 — круглый провод ПЭВ-2; 1–4 — толщина изоляции 0,27 мм; 1', 2', 3' — толщина изоляции 0,33 мм

лированных проводников, свободного пространства паза (сечения паза в свету за вычетом сечения корпусной изоляции и клина); $f_к$ — отношение сечения свободного пространства паза к сечению паза в свету — коэффициент использования паза под укладку.

Для прямоугольного провода:

$$f_М = \frac{q_М}{(a + d_{из}) \cdot (b + d_{из})}; \qquad (4.3)$$

для круглого:

$$f_М = \frac{q_М}{(d + d_{из})^2}, \qquad (4.4)$$

где a и b — ширина и высота прямоугольного провода без изоляции, мм; $d_{из}$ — двусторонняя толщина изоляции, мм; d — диаметр круглого провода без изоляции, мм.

Например, для круглых проводов сечением по меди 1,5 мм² марки ПЭЛБО $f_М$ = 0,6 для проводов с эмалевой изоляцией $f_М$ возрастает до 0,67, для проводов ПБД падает до 0,55. Коэффициент $f_п$

обычно бывает в пределах 0,68–0,73 для круглого провода и 0,6–0,7 для прямоугольного с дополнительной междувитковой изоляцией (он тем больше, чем меньше число витков и тоньше дополнительная изоляция).

Коэффициент использования паза под укладку определяется выражением:

$$f_{КК} = f_{КУ} h_{ПУ} / h_{П}, \qquad (4.5)$$

где $f_{КУ}$ — условное отношение сечения свободного для укладки проводников пространства к сечению паза в свету за вычетом прокладок и клина (зависимость $f_{КУ}$ от $k_{ИЗ}$ представлена на рис. 90); $k_{ИЗ}$ — отношение толщины односторонней изоляции паза (с учетом допусков на укладку и разбухание) к средней ширине паза в свету; $h_{ПУ}$ — условная высота паза; $h_{П}$ — действительная высота паза.

Значения $f_{КУ}$, $h_{ПУ} / h_{П}$ и $f_{К}$ приведены в табл. 55.

В табл. 56 представлены средние значения коэффициентов заполнения паза статора медью $f_{МП К}$ для машин переменного тока общего назначения.

Коэффициент заполнения паза медью в некоторых машинах, выпускавшихся до последнего времени, низок для обмоток из круглого

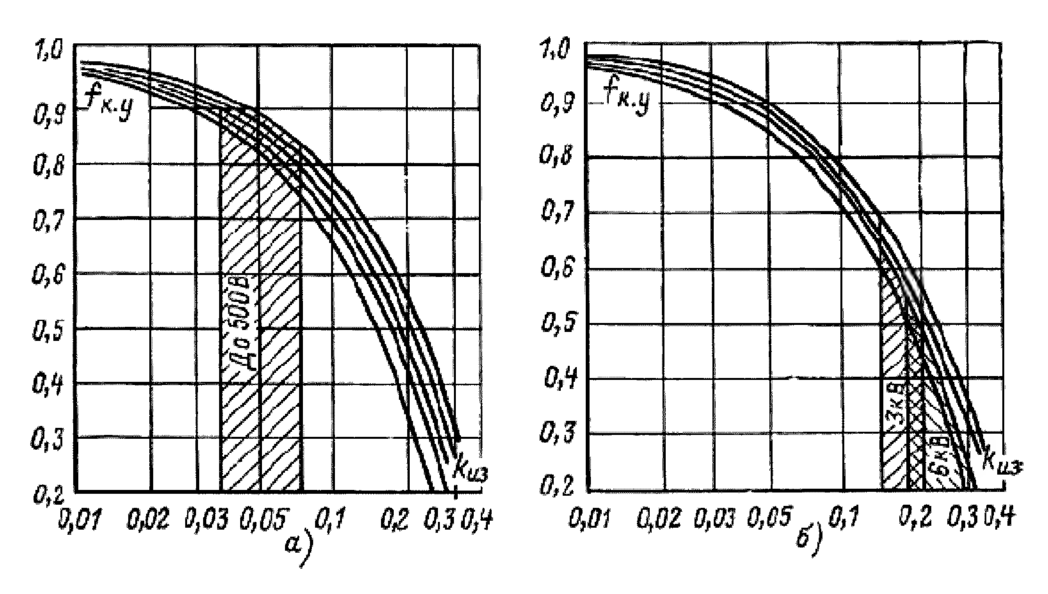


Рис. 90. Зависимость $f_{КУ}$ и $k_{ИЗ}$ при различных отношениях $h_{П.У} / b_{П}$ для обмоток из круглого провода (а) и обмоток на напряжение 3 и 6 кВ из прямоугольного провода (б); заштрихованы зоны практического использования

Таблица 55

Значения коэффициентов использования паза

Обмотка	$f_{к.у}$	$h_{п.у} / h_{п}$	$f_{к}$
Из круглого провода на напряжение до 500В	0,82–0,88	0,85	0,72
Из прямоугольного провода на напряжение 3300В	0,45–0,67	0,90	0,40–0,60
То же 6600В	0,33–0,50	0,90	0,30–0,45

Таблица 56

Средние значения коэффициентов заполнения паза

Обмотка	$f_{м}$	$f_{п}$	$f_{к}$	$f_{м.п.к}$
Из круглого провода ПЭЛБО на напряжение до 500В	0,59	0,70	0,72	0,30
Из прямоугольного провода ПБД или ПСД на напряжение 3300В	0,78	0,70–0,80	0,40–0,60	0,22–0,37
Из прямоугольного провода на напряжение 6600В	0,78	0,60–0,70	0,30–0,45	0,14–0,25

провода из-за значительной толщины его изоляции (0,21–0,27 мм на обе стороны) и особенно для обмоток высокого напряжения из-за большой толщины витковой и корпусной изоляции. Уменьшение толщины корпусной и витковой изоляции путем применения термореактивной изоляции дает возможность соответственно уменьшить сечение паза, что приведет к повышению коэффициента его заполнения и при тех же значениях магнитной индукции в зубцах и спинке магнитопровода статора — к снижению массы активной стали и потерь в ней, т. е. к повышению КПД и снижению массы двигателя. Возможно также, оставляя сечение паза неизменным, увеличить сечение меди проводников, что позволит повысить КПД двигателя благодаря уменьшению потерь в них. Уменьшать размеры паза статора целесообразно так, чтобы отношение его высоты к ширине оставалось неизменным. Площадь сечения паза в этом случае будет сокращаться пропорционально квадрату уменьшения его средней ширины, и ширина зубца будет увеличиваться.

Если исходить из условия сохранения отношения максимального момента к номинальному и неизменности плотности тока в обмотке статора, то коэффициент повышения мощности электродвигателя будет определяться выражением:

$$k_P = 1/(b_П / \sqrt{k_M} + b_Z)^3, \qquad (4.6)$$

где k_M — коэффициент повышения заполнения паза медью; $b_П$ и b_Z — доли паза и зуба в зубцовом шаге.

Принимая близкое к обычному $b_П = b_Z = 0{,}5$, получаем:

$$k_P = 1/(0{,}5/\sqrt{k_M} + 0{,}5)^3. \qquad (4.7)$$

При $k_M = 1{,}0 \div 1{,}3$:

$$k_P = 1 + 0{,}75(k_M - 1). \qquad (4.8)$$

Из выражения (4.8) следует, что повышение заполнения паза медью на 1 % дает возможность увеличить мощность электродвигателя на 0,75 %.

Максимальное повышение мощности электродвигателя со всыпной обмоткой из провода ПЭЛБО при доведении толщины его изоляции и пазовой изоляции до нуля равнялось бы 50 % при коэффициенте заполнения паза медью 78 %. При конструировании изоляции обмотки толщину изоляции следует сокращать так, чтобы не снижалась эксплуатационная надежность электрической машины. Применение тонких изоляционных материалов с высокой электрической и механической прочностью и высокопрочных эмалированных проводов дает возможность повысить мощность машин на 15–25 % либо при неизменной мощности уменьшить массу машин без снижения ее эксплуатационной надежности. Повышение коэффициента заполнения пазов медью в таких обмотках возможно за счет уменьшения толщины витковой и корпусной изоляции. Так, применение для обмоток проводов марки ППЛБО с толщиной изоляции 0,5 мм, не требующих усиления, повышает коэффициент заполнения паза медью на 15–24 %, что дает увеличение мощности электродвигателей на 11–17 %. Применение корпусной изоляции «монолит» на эпоксидных связующих вместо микалентной на битумном компаунде дает возможность уменьшить толщину изоляции на 20–30 %, что также повышает мощность электродвигателей.

Практически коэффициенты заполнения пазов машин значительно отличаются от теоретически возможных, т. к. укладка обмоток при высоком заполнении паза затруднена и изоляция повреждается тем больше, чем выше коэффициент заполнения паза, поэтому его значения следует ограничить.

Степень повреждаемости обмотки зависит не только от коэффициента заполнения паза, но и от ее геометрии, размера провода и типа его изоляции, примененных изоляционных материалов и их толщины (рис. 91). Это обстоятельство следует учитывать, задаваясь при конструировании электрической машины определенным коэффициентом заполнения паза. Рекомендации по максимально допустимым коэффициентам заполнения паза в зависимости от типа обмоток, типа и диаметра обмоточного провода и вида пазовой изоляции приведены в табл. 57. Вторым путем увеличения удельной мощности электрических машин является применение изоляции с более высокой нагревостойкостью, что позволяет повысить перегревы, т. е. силу тока при тех же сечениях провода обмотки. Но увеличение тока при том же сечении вызывает повышение потерь в меди и, следовательно, снижение КПД машины.

Увеличение перегревов машин приводит также к снижению срока службы изоляции, в связи с чем необходим тщательный выбор оптимальной системы изоляции для повышения эксплуатаци-

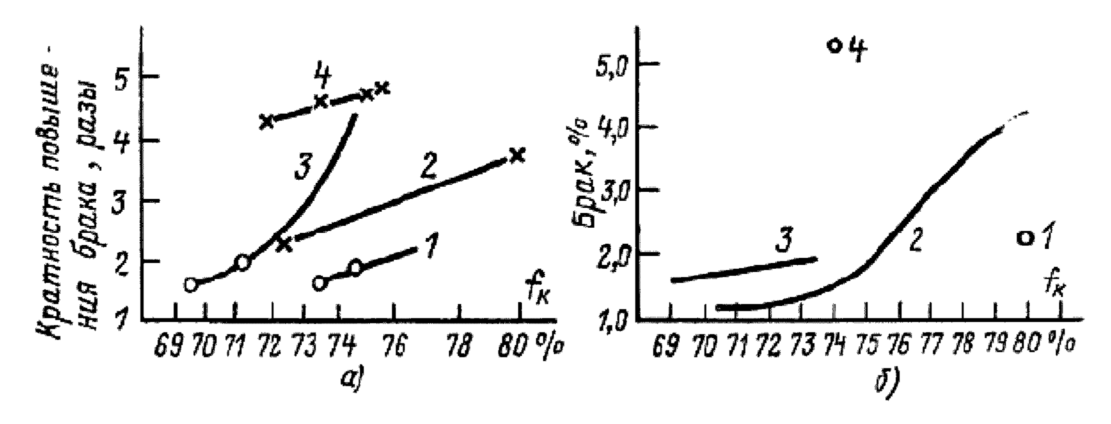


Рис. 91. Зависимость количества пробоев при испытании напряжением пазовой изоляции статоров электродвигателей с высотой центров 250 мм от коэффициента заполнения паза$f_к$: а — после укладки обмотки; б — готовых машин, обмотка из провода ПЭТВ диаметром: 1 — 1,35–1,40 мм; 2 — 1,45–1,56 мм; 3, 4 — 1,62 мм; 1–3 — четырех-, шести-, восьми- и десятиполюсные машины; 4 — двухполюсные машины

Таблица 57

Максимально допустимые коэффициенты заполнения паза

Паз	Обмотка	Пазовая изоляция	Провод	Диаметр круглого провода, мм	Сечение прямоугольного провода, мм^2	Оптимальный коэффициент заполнения паза, %
Полузакрытый	Всыпная	Пленкоэлектрокартон, электрокартон с лакотканью	ПЭЛБО	До 1,25 Свыше 1,25 До 1,80	— — —	68* 65*
		Гибкие миканиты, слюдиниты, слюдопласты, пленкосинтокартоны	ПСД, ПСДК, ПСДКТ, ПСДТ	До 1,24 Свыше 1,25 До 1,70	— — —	65* 62*
		Пленкоэлектрокартон, электрокартон с лакотканью	ПЭВ-2, ПЭМ-2	До 1,25 Свыше 1,25 До 1,70	— —	72* 70*
		Пленкосинтокартоны, гибкие миканиты, слюдиниты, слюдопласты	ПЭТВ, ПЭТ-155, ПЭФ-155	До 1,25 Свыше 1,25 До 1,60	— —	72* 70*
Полуоткрытый	Полукатушечная	Пленкоэлектрокартон, электрокартон с лакотканью	ПБД	—	До 20	87
		Гибкие миканиты, слюдиниты, слюдопласты	ПСД	—	До 20	87
		Пленкоэлектрокартон, гибкие миканиты, лакотканеслюдопласты	ПЭТВП, ПЭВП, ПЭТП-155	—	До 20	87
Открытый	Катушечная изолированная обмотка	Непрерывная или гильзовая изоляция	Прямоугольный	—	До 15	75–88

* — для двухполюсных машин коэффициент заполнения паза должен быть уменьшен на 5 %.

онной надежности обмотки. Снижение перегревов машин может быть достигнуто путем применения более тонких, а также более теплопроводящих материалов, увеличения монолитности изоляции и улучшения ее теплоотдачи (особенно в результате увеличения поверхностей, отдающих тепло, и улучшения вентиляции). Исходным моментом при конструировании изоляции обмоток электрических машин должно быть обеспечение длительной эксплуатации изоляции при заданных условиях окружающей среды. Для разных микроклиматических районов машины имеют разные исполнения. В зависимости от места нахождения электрических машин (на открытом воздухе, в помещении с кондиционированным воздухом и т. п.). Электрические машины работают в различных температурных условиях и при различной влажности воздуха. Нормальные условия окружающей среды — значения температуры, влажности воздуха, высоты над уровнем моря, в пределах которых в данной географической зоне обеспечивается нормальная эксплуатация машин общего назначения. В качестве температуры окружающей среды следует принимать: для машин с самовентиляцией — температуру воздуха на расстоянии 1–3 м от машины; для машин с принудительной вентиляцией — температуру вхоящего воздуха; для машин с встроенными охладителями — температуру охлаждающего вещества на входе и охладитель. В качестве расчетной температуры окружающей среды при определении допустимых превышений температур для электрических машин принимается верхнее значение температуры воздуха. С уменьшением плотности воздуха увеличивается фактическое превышение температуры машин, и при их работе на высоте более 1000 м необходимо снизить номинальную нагрузку согласно поправке на высоту. Следует учитывать, что действие влаги на использованные в конструкциях материалы зависит от сочетания относительной влажности с температурой; причем большее влияние на степень увлажнения оказывает повышение температуры, чем влажности (рис. 92, 93). Поэтому для работы в тропических условиях необходимо применять особо влагостойкую изоляцию, чтобы изоляция машин слабо увлажнялась (рис. 94). При конструировании изоляции машин, работающих в тропических условиях, также следует учитывать, что на целлюлозных материалах в условиях тропиков может развиваться плесень, поэтому для тропиков следует применять изоляци-

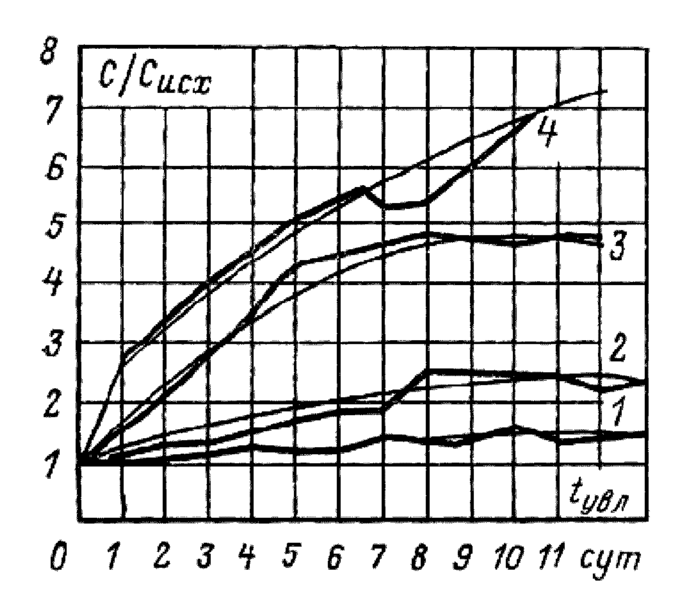


Рис. 92. Зависимость отношения емкости изоляции в процессе увлажнения (при 95–100 % относительной влажности воздуха и различных температурах) к исходной емкости $C/C_{исх}$ электродвигателя 6-го габарита исполнения Т от времени увлажнения: 1 — при 20 °С; 2 — при 40 °С; 3 — при 55 °С; 4 — при 70 °С

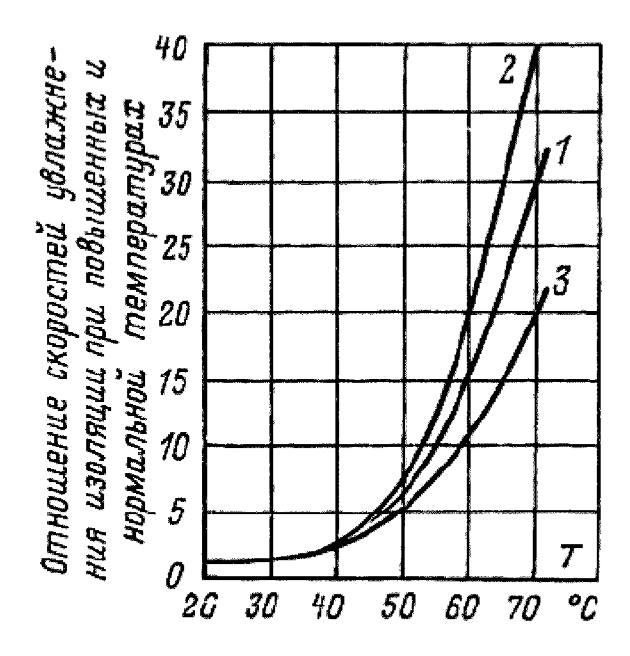


Рис. 93. Зависимость отношения скорости увлажнения изоляции электродвигателей при повышенных температурах к скорости ее увлажнения при 20 °С (в атмосфере при 98–100-процентной относительной влажности воздуха): 1 — среднее отношение; 2 — максимальное; 3 — минимальное

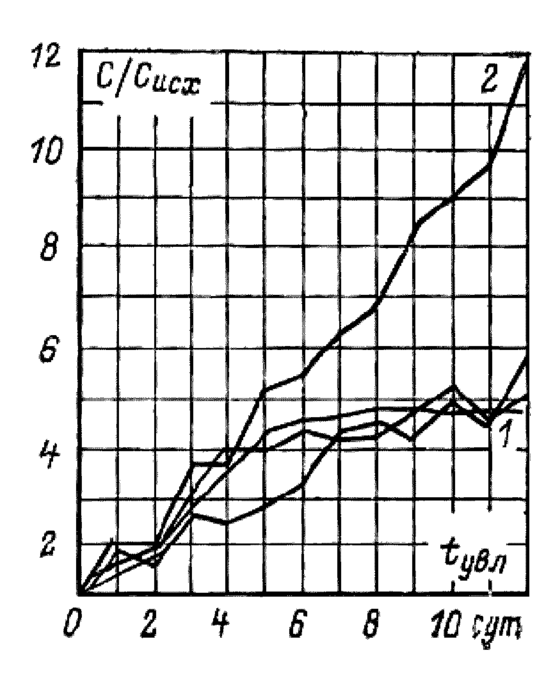


Рис. 94. Отношение емкости изоляции в процессе увлажнения (при 98–100-процентной относительной влажности воздуха и температуре 55 °С) к исходной емкости $C/C_{исх}$ для электродвигателей 6-го габарита:
1 — изоляция исполнения Т — (сухим и влажным тропическим);
2 — изоляция исполнения У — (умеренным)

онные материалы на основе слюды, стекловолокна и синтетических смол. Электроизоляционные материалы должны быть подобраны таким образом, чтобы они обеспечивали длительную надежную эксплуатацию электрической машины. При их выборе исходят из значений температур нагрева узлов.

Температура,°С, наиболее нагретой части обмотки вычисляется по выражению:

$$t_{макс} = t_{окр} + q + \Delta q , \qquad (4.9)$$

где $t_{окр}$ — температура окружающей среды; q — превышение средней температуры обмотки над температурой окружающей среды; Dα — разность между средней температурой и температурой наиболее нагретой части.

Значение Dα зависит от конструкции обмотки, максимальной температуры и способа измерения средней и максимальной температур (термометром, термопарой или методом сопротивления).

Электроизоляционные материалы для машин исполнения У должны выбираться таким образом, чтобы предельно допустимая для них рабочая температура (характеризующаяся классом нагревостойкости) была равна или больше температуры в самом нагретом месте электроизоляционной конструкции. В машинах тропического исполнения температура в самом нагретом месте должна быть меньше предельно допустимой рабочей температуры исследованных изоляционных материалов на значение температурного запаса k. Этот температурный запас устанавливается в связи с более тяжелыми условиями эксплуатации изоляции в тропиках, а также из-за применения иногда новых недостаточно проверенных практикой материалов классов нагревостойкости Е, F и Н. В табл. 58 приведены расчетные параметры нагрева для обмоток тропического исполнения с изоляцией различных классов нагревостойкости.

Температура окружающей среды для машин исполнения Т принимается равной верхнему значению номинальной температуры

Таблица 58

Параметры нагрева

Показатель	Категория	Допустимые превышения температуры, °С, для класса нагревостойкости изоляции				
		A	E	B	F	H
Температура, характеризующая нагревостойкость материала, $t_{макс.норм}$	—	105	120	130	155	180
Температурный запас К	1	10	15	10	20	20
	2	5	10	5	15	15
Поправка на наиболее нагретое место $\Delta\theta$ (измерение температуры методом сопротивления)	—	5	5	10	10	15
Средняя температура обмоток с учетом номинальной температуры окружающей среды	1	90	100	110	125	140
	2	95	105	115	130	150
Предельно допустимые повышения температуры обмотки $Q_{пред.троп}$	1	45	55	65	80	100
	2	50	60	70	85	105

Примечание: 1 — для работы на открытом воздухе; 2 — для работы в помещениях, где колебания температуры и влажности воздуха несущественно отличаются от колебаний на открытом воздухе.

в тропиках, т. е. 45 °С. Значения предельно допустимых превышений температуры для различных узлов электрических машин исполнений У и Т указаны в табл. 59, 60.

Изоляция исполнений У, ХЛ и Т не рассчитана для работы в среде агрессивных веществ, присутствие которых, как правило, сочетается с повышенной влажностью. Для таких условий машину

Таблица 59

Предельно допустимые превышения температуры, °С, для различных узлов электрических машин исполнений У и Т (при измерении методом сопротивления)

Части машин	Условия работы	Классы нагревостойкости изоляции									
		A		E		B		F		H	
		У	Т	У	Т	У	Т	У	Т	У	Т
Обмотки переменного тока явнополюсных машин и асинхронных машин мощностью до 5000 кВ · А с длиной сердечника до 1 мм. Обмотки возбуждения машин постоянного и переменного тока с возбуждением постоянным током (за исключением однослойных), обмотки якорей, соединенных с коллектором	На открытом воздухе	60	45	75	55	80	65	100	80	125	100
Обмотки возбуждения малого сопротивления, многослойные и компенсационные	В помещениях и под навесом		50		60		70		85		105
Обмотки возбуждения однослойные с неизолированными поверхностями	На открытом воздухе	65	50	80	60	90	75	110	90	135	110
	Под навесом		55		65		80		95		115
Стержневые обмотки роторов асинхронных машин	На открытом воздухе	65	50	80	60	90	75	110	90	135	110
	Под навесом		55		65		80		95		115
Статорные обмотки машин высокого напряжения	На открытом воздухе	60	45	75	50	80	60	Не изготовляются			
	Под навесом		50		60		70				

Таблица 60

Предельно допустимые превышения температуры, °С, для различных узлов электрических машин исполнений У и Т (при измерении методом термометра)

Части машин	Категория	Классы нагревостойкости изоляции									
		A		E		B		F		H	
		У	Т	У	Т	У	Т	У	Т	У	Т
Изолированные обмотки, постоянно замкнутые накоротко	На открытом воздухе	60	45	75	55	80	65	100	80	125	100
Стальные сердечники и другие части, соприкасающиеся с изоляцией	Под навесом или в помещении		50		60		70		85		105
Коллекторы и контактные кольца, незащищенные и защищенные	На открытом воздухе	60	45	70	55	80	65	90	75	100	85
	Под навесом или в помещении		50		60		70		80		90

Примечание: Для неизолированных обмоток, постоянно замкнутых накоротко, и частей, не соприкасающихся с изоляцией, превышение температуры не должно достигать значения, при котором возникает опасность повреждения изолирующих или других материалов смежных частей.

необходимо изготавливать в специальном химически стойком исполнении. В первую очередь для устранения непосредственного контакта с агрессивной средой следует выбирать закрытое исполнение машины. Химически активные газообразные вещества могут быть как кислого, так и основного характера, причем воздействие каждого из них на один и тот же материал различно. Особенно сильно в химически активных средах повреждается изоляция на основе целлюлозы. Несравненно устойчивее изоляция на основе стекла, слюды и некоторых синтетических смол. Максимально допустимые концентрации агрессивных веществ в производственных помещениях при температуре 0–40°С и относительной влажности воздуха 90 % приведены в табл. 61.

Нужно учесть, что в случае производственных неполадок эти концентрации могут быть намного выше. Значения предельно до-

Таблица 61

Максимально допустимые концентрации агрессивных веществ

Вещество	Концентрация, г/м^3
Аммиак NH_3	0,02
Сернистый ангидрид SO_2	0,02
Окислы азота N_2O_5	0,05
Серный ангидрид SO_3	0,002
Серная кислота H_2SO_4	0,002
Хлористый водород и соляная кислота HCl	0,01
Хлор Cl_2	0,007

пустимых температур для изоляции химически стойких машин такие же, как для машин исполнения У. При подборе материалов для изоляционной конструкции следует обращать внимание на их совместимость, особенно при высоких рабочих температурах обмоток. Так, уже при 105°С из поливинилхлорида и неопрена может выделяться хлористый водород, разрушая находящуюся рядом изоляцию. Влага, особенно в герметичных конструкциях, при повышенных температурах может привести к гидролизу полиэфирных материалов. В герметичном оборудовании не рекомендуется использовать целлюлозные материалы (хлопчатобумажные лакоткани и др.). Поверхность материалов, способных к интенсивной термоокислительной деструкции (например, каучуковые стеклолакоткани), по возможности следует защищать от соприкосновения с воздухом. Пропиточные лаки также не должны оказывать вредного воздействия на изоляцию. Ниже приводятся рекомендации по конструктивному исполнению изоляции электрических машин, рассчитанных на работу при нормальном числе пусков и реверсов, отсутствии сильных толчков и вибраций. В случае работы машин при сильных толчках и вибрациях и при повышенном количестве пусков и реверсов изоляция должна быть соответственно усилена. Особенно следует усилить крепление обмотки и всемерно уменьшить кратность пускового тока. При конструировании изоляции электрических машин следует уделять особое внимание равной надежности всех ее элементов по электрической и механической прочности, стойкости к тепловому старению и влагостойкости. Выбор толщины изоляции

узлов машин низкого напряжения обусловливается прежде всего теми механическими нагрузками, которые могут на нее воздействовать в процессе изготовления и эксплуатации машины. При выборе изоляции для машин высокого напряжения следует также учитывать максимальные значения напряженности электрического поля и изоляции обмоток и возможность перенапряжений.

4.2. Конструкции изоляции обмоток машин общего назначения

4.2.1. Изоляция электродвигателей малой мощности (5–600 Вт) на напряжение до 660 В

Для работы в сетях переменного тока частотой 50 Гц при частоте вращения до 3000 мин$^{-1}$ электродвигатели обычно изготовляют асинхронными с короткозамкнутым ротором. Для работы с более высокими частотами вращения выпускают коллекторные двигатели. Обмотки статоров асинхронных микроэлектродвигателей обычно выполняют из эмалированных проводов. Конструкция их корпус-

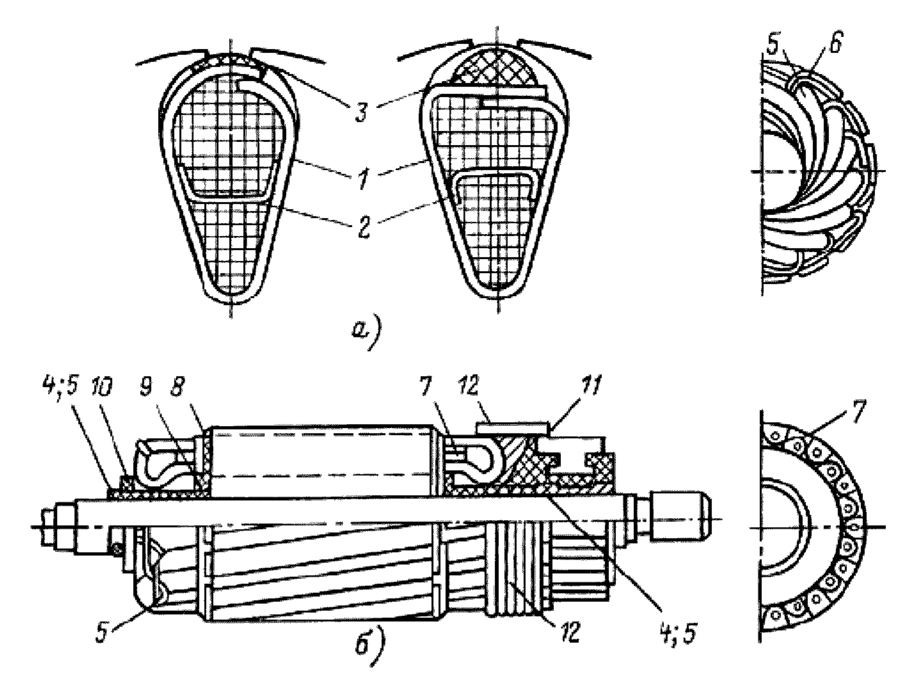


Рис. 95. Изоляция якорных обмоток коллекторных микродвигателей малой мощности: а — пазовая часть; б — лобовая часть, вал; 1, 2, 4, 7 — пленкосинтокартон; 3 — клин; 5, 6, 11 — лента лавсановая; 8–10 — электронит; 12 — стеклобандажная лента

ной изоляции аналогична конструкции изоляции асинхронных двигателей мощностью 1–7 кВт, но в связи с меньшими механическими усилиями, возникающими в процессе намотки обмотки статоров и в эксплуатации, толщина изоляции выбирается меньшей, чем в электродвигателях мощностью 1–7 кВт (0,2–0,25 мм). Изоляция якорных обмоток коллекторных микродвигателей приведена на рис. 95 и в табл. 62.

Для якорей с частотой вращения до 5000–6000 мин$^{-1}$ обычно применяют провода с эмалевой изоляцией (ПЭВ — для класса нагревостойкости А, ПЭТВ — для класса В, ПЭТ-155 — для класса F), для якорей с частотой вращения 5000–6000 мин$^{-1}$ — провода с во-

Таблица 62

Изоляция якорных обмоток коллекторных микроэлетродвигателей (классы нагревостойкости В и F всех исполнений, кроме химически стойкого)

Материал				Количество слоев	Общая толщина, мм	
Наименование	Марка для классов		Толщина, мм		По ширине	По высоте
	B	F				
Пленкосинтокартон	ПСК-Л	ПСК-Ф	0,27	1	0,34	0,81
Пленкосинтокартон	ПСК-Л	ПСК-Ф	0,27	1	—	0,27
Крышка пазовая или клин	—	—	0,38	1	—	0,38
Изоляция паза без клина	—	—	—	—	0,54	1,08
Пленкосинтокартон	ПСК-Л	ПСК-Ф	0,27	1	—	—
Лента лавсановая	Тафтяная		0,16	1 вполнахлеста	—	—
Лента лавсановая	Тафтяная		0,16	—	—	—
Пленкосинтокартон	ПСК-Л	ПСК-Ф	0,27	1	—	—
Электронит	—	—	1,5	1	—	—
Электронит	—	—	1,0	2–3	—	—
Лента лавсановая	Тафтяная		0,16	2 вполнахлеста	—	—
Лента стеклобандажная	ЛСБ-В	ЛСБ-F	0,2	по расчету	—	—

локнистой изоляцией (ПЭЛШКО — для класса нагревостойкости А, ПСДТ — для классов В и F). Эти провода пригодны для машин исполнений У, Т и ХЛ. Для машин химически стойкого исполнения применяют только провода ПСДТ. Для машин всех исполнений с изоляцией классов нагревостойкости В и F пазовую междукатушечную и междуслойную изоляцию выполняют из пленкосинтокартона ПСК-Л и ПСК-Ф. В машинах химически стойкого исполнения он должен быть заменен гибким стекломиканитом ГФС-Т толщиной 0,25–0,3 мм и лакостекломиканитом ГФГ-Т-ЛСБ толщиной 0,5 мм. Лавсановая лента должна быть заменена стеклянной.

Статорные обмотки коллекторных микроэлектродвигателей обычно выполняют из проводов ПЭВ-2 (класса нагревостойкости А), ПЭТВ (класса В), ПЭТ-155 (класса F). Для машин химически стойкого исполнения применяют провода ПСДТ. Изоляция статорных обмоток коллекторных микроэлектродвигателей показана на рис. 96 и в табл. 63.

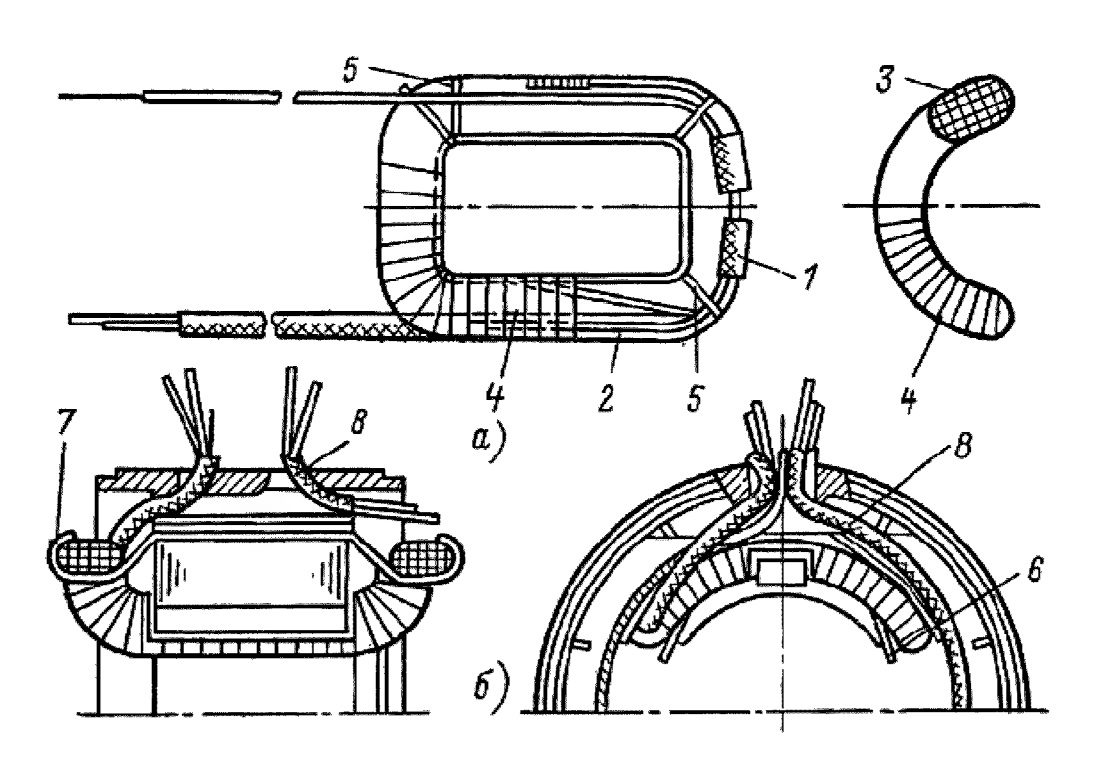


Рис. 96. Изоляция статорных обмоток коллекторных электродвигателей малой мощности: а — катуш ка; б — статор с обмоткой; 1, 2 — трубка линоксиновая; 3 — электрокартон; 4 — лента лавсановая; 5 — чулок хлопчатобумажный; 6, 7 — электрокартон; 8 — трубка линоксиновая

Таблица 63

Изоляция статорных обмоток коллекторных микроэлектродвигателей

Класс А, исполнение У				Классы В и F, все исполнения			
Материал			Количество слоев	Материал			Количество слоев
Наименование	Марка	Толщина, мм		Наименование	Марка	Толщина, мм	
Трубка линоксиновая	ТЛВ	—	—	Трубка фторорганическая	ТРФ	—	—
Электрокартон	ЭВ	0,2	1	Стеклолакоткань	ЛСП	0,2	1
Лента лавсановая	Тафтяная	0,16	1 вполнахлеста	Лента лавсановая	Тафтяная	0,16	1 вполнахлеста
Чулок хлопчатобумажный	—	1,1—2,0	—	Стеклочулок	АСЭЧ (б)	1,1—2,0	—
Электрокартон	ЭВ	0,2	2	Стеклолакоткань	ЛСП	0,2	2
Трубка линоксиновая	ТЛВ	—	—	Трубка фторорганическая	ТРФ	—	—

В процессе намотки на выводы катушек якоря надевают хлопчатобумажные чулки (для класса нагревостойкости А микродвигателей исполнения У) или стеклянные (для класса А электродвигателей исполнений ХЛ и химически стойкого и класса В электродвигателей всех исполнений). Катушки статора на углах перевязывают дважды: при намотке половины и полного количества витков. Изоляция катушки должна на 10–15 мм выступать за магнитопровод. На внутренних сторонах и боковых углах катушки производится выкладка из электрокартона, пленкосинтокартона, стеклолакоткани или лакостеклослюдопласта. Изоляция магнитопроводов может осуществляться и методом напыления эпоксидными порошками с последующим оплавлением и запечкой.

Выводной провод в месте выхода из-под изоляции бандажируют хлопчатобумажным или стеклянным чулком либо лавсановой лен-

той. Выводы и места пайки изолируют линоксиновыми трубками ТЛВ (для класса нагревостойкости А двигателей исполнения У) или трубками ТРФ и ТКСП (для классов нагревостойкости В и F всех исполнений). В машинах химически стойкого исполнения следует применять только трубки ТРФ или ТКСП, стеклянную ленту или стеклолакоткани ЛСЛ, ЛСБ, ЛСК.

Пропитка якорей коллекторных электродвигателей исполнения У может производиться однократно составами типа КП (КП-103, КП-34), электродвигателей исполнений ХЛ, Т и химически стойкого при частоте вращения до 5000 $мин^{-1}$ — лаком МЛ-92 (двухкратно окунанием или однократно при повышенном количестве пленкообразующих под вакуумом и давлением), при частоте вращения свыше 5000 $мин^{-1}$ — бакелитовым лаком. Статорные обмотки с изоляцией классов нагревостойкости А и В двигателей исполнения У можно пропитывать однократно составами типа КП, обмотки исполнений ХЛ, Т или химически стойкого классов нагревостойкости А и В — лаком МЛ-92, класса F — лаком КО-916к.

4.2.2. Изоляция статорных обмоток асинхронных двигателей и синхронных генераторов мощностью 0,6–100 кВт на напряжение до 660 В

Статоры асинхронных двигателей и синхронных генераторов мощностью до 100 кВт, как правило, имеют всыпную обмотку. Для обмоток всех исполнений, кроме химически стойкого, обычно применяют эмалированные провода ПЭВ-2 (для класса нагревостойкости А), ПЭТВ и ПЭТВМ (для класса В), ПЭТ-155, ПЭФ-155 (для класса F). Для машин химически стойкого исполнения класса нагревостойкости до F включительно следует использовать провода ПСДТ и ПСД, для класса нагревостойкости Н — ПСДК и ПСДКТ (также и для машин тропического исполнения). При конструировании обмоток из эмалированных проводов ПЭТВМ, ПЭТМ, ПЭТВ, ПЭТ-155 и др. следует учитывать возможность снижения стойкости эмалевой изоляции к термоударам, а также снижения стойкости к растворителям, кипящей воде, пробивному напряжению и срока службы эмалевой изоляции по мере повышения относительного удлинения провода при намотке. Геометрия обмотки должна быть такой, чтобы в закругленных головках катушек не появлялись тре-

щины изоляции проводов при пропитке и сушке, а также микродефекты, развитие которых в процессе эксплуатации приведет к ускорению выхода из строя обмоток. Во избежание этих явлений в обмотке из эмалированных проводов ПЭТВ и ПЭТ-155 нежелательно иметь места с относительным удлинением более 10 %. Радиус изгиба проводов в обмотке с учетом допустимых относительных удлинений l_2, %, рассчитывается по следующим формулам:

$$l = \frac{(d + \delta)\cdot 100}{(2R + d + \delta)} = \frac{(d + \delta)\cdot 100}{2R + d + \delta}, \tag{4.10}$$

где d — диаметр сечения провода по меди, мм; δ — двойная толщина изоляции, мм; R — радиус изгиба провода в обмотке, мм.

Отсюда:

$$R = \frac{1}{2}(d + \delta)(100/l - 1). \tag{4.11}$$

Для l = 5%:

$$R = 9{,}5\,(d + \delta). \tag{4.12}$$

То есть радиус изгиба провода должен быть не меньше 10,5-кратного значения диаметра провода с изоляцией.

Допустимые относительные удлинения эмалированных проводов новых марок в обмотках должны быть установлены на основании их всесторонних исследований. В тех случаях, когда к изоляции обмоток предъявляются требования повышенной надежности, относительное удлинение проводов ПЭТ-155 и ПЭТВ должно быть как можно меньше. Следует учесть, что на надежность обмотки влияет также скорость намотки, т. к. при больших скоростях намотки происходит дополнительное удлинение эмалированного провода, особенно вследствие рывков.

При сушке после пропитки обмоток из проводов ПЭТВ их температура не должна превышать 170 °С. Не рекомендуется даже кратковременно повышать температуру более 170–180 °С, т. к. уже при 190 °С могут появиться трещины (даже на нерастянутом проводе ПЭТВ появляется множество микротрещин). Пропитка кремнийорганическим лаком КО-964Н при температуре сушки 150–160 °С повышает срок службы эмалевой изоляции обмоток ПЭТВ и ПЭТ-155 благодаря наиболее благоприятному сочетанию эмалевых пле-

нок с пленкой кремнийорганического лака. Следует стремиться к применению эмалированных проводов с высокой стойкостью к тепловым ударам. Этим требованиям отвечают провода ПЭТ-155 и ПЭФ-155. По возможности не нужно применять провода больших диаметров, жесткость которых затрудняет укладку обмоток (особенно со стекловолокнистой изоляцией) и приводит к значительной повреждаемости изоляции при укладке. Стойкость эмалевой изоляции проводов к тепловому удару, а также к растворителям и воде тем ниже, чем больше диаметр провода. Для электродвигателей мощностью до 100 кВт следует считать предельным диаметр провода 1,6 мм. Машины мощностью до 7 кВт обычно выполняются с однослойной обмоткой, свыше 10 кВт — с двухслойной. Однослойные обмотки (рис. 97, табл. 64), как правило, содержат катушки разной формы, в двухслойных все катушки имеют одинаковую форму.

В случае химически стойкого исполнения машины и для изоляции класса нагревостойкости Н должны быть применены пленкосинтокартоны на основе полиамидной бумаги (номекса, фенелоновой) и полиимидной пленки, а также стеклотекстолиты и стеклочулки. При двухслойной обмотке изоляция между катушками (междуфазная) должна быть такой же надежной, как корпусная. Это условие выполняется при использовании пленкосинтокартонов и композиционных материалов — лакостеклослюдопластов

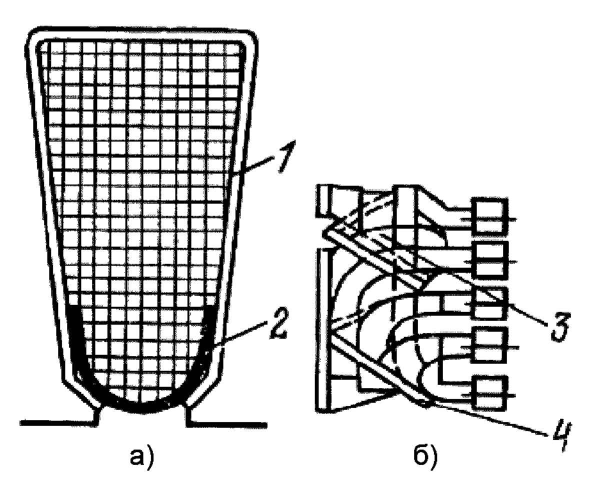


Рис. 97. Изоляция статорных обмоток асинхронных двигателей мощностью 1–7 кВт: а — пазовая часть; б — лобовая часть; 1 — пленкосинтокартон; 2 — крышка пазовая — пленкосинтокартон; 3 — пленкосинтокартон; 4 — лента лавсановая

Таблица 64

Изоляция статорных обмоток электродвигателей и синхронных генераторов мощностью 1–7 кВт (классы нагревостойкости B и F всех исполнений, кроме химически стойкого)

Материал				Число слоев		Толщина, мм	
Наименование	Марка для классов B	Марка для классов F	Толщина, мм	По ширине	По высоте	По ширине	По высоте
Пленкосинтокартон	ПСК-Л	ПСК-Ф	0,27	1	1	0,54	0,81
Крышка пазовая пленкосинтокартон	ПСК-Л	ПСК-Ф	0,38	—	1	—	—
Всего на паз без клина	—	—	—	—	—	0,54	0,81
Пленкосинтокартон	ПСК-Л	ПСК-Ф	0,27	—	—	—	—
Лента лавсановая	Тафтяная		0,16	—	—	—	—

в машинах исполнения У общего назначения и лакостекломиканитов и пленкосинтокартонов в машинах тропического исполнения. В ряде случаев следует упрочнять корпусную изоляцию на выходе из паза, для чего применяют концевые шайбы из электронита толщиной 3–4 мм, опорные кольца. Обмотки двигателей мощностью до 7 кВт, а иногда и выше укладываются машинным способом, поэтому к их пазовой изоляции предъявляется требование достаточной упругости. Условия укладки двухслойных обмоток машин мощностью выше 10 кВт более тяжелые и толщина их пазовой изоляции больше (для машин с высотой центров 225–250 мм рекомендуется не менее 0,38 мм, 280–315 мм — не менее 0,55 мм). В случае тяжелых условий укладки изоляцию следует армировать стеклолакотканью с манжетой. Катушки статоров электродвигателей мощностью выше 10 кВт изготовляют с обмотками двух типов — катушечной (рис. 98, б) и рамочной (рис. 98, а) или концентрической (рис. 98, в). При рамочной или концентрической обмотках лобовые части катушек изолируют прокладками. Такая обмотка менее надежна, чем катушечная, где изоляция наносится непосредственно на лобовую часть. Кроме того, отсутствие зазоров между обмотками в лобовой части ухудшает теплоотдачу, приводит к более высоким нагревам

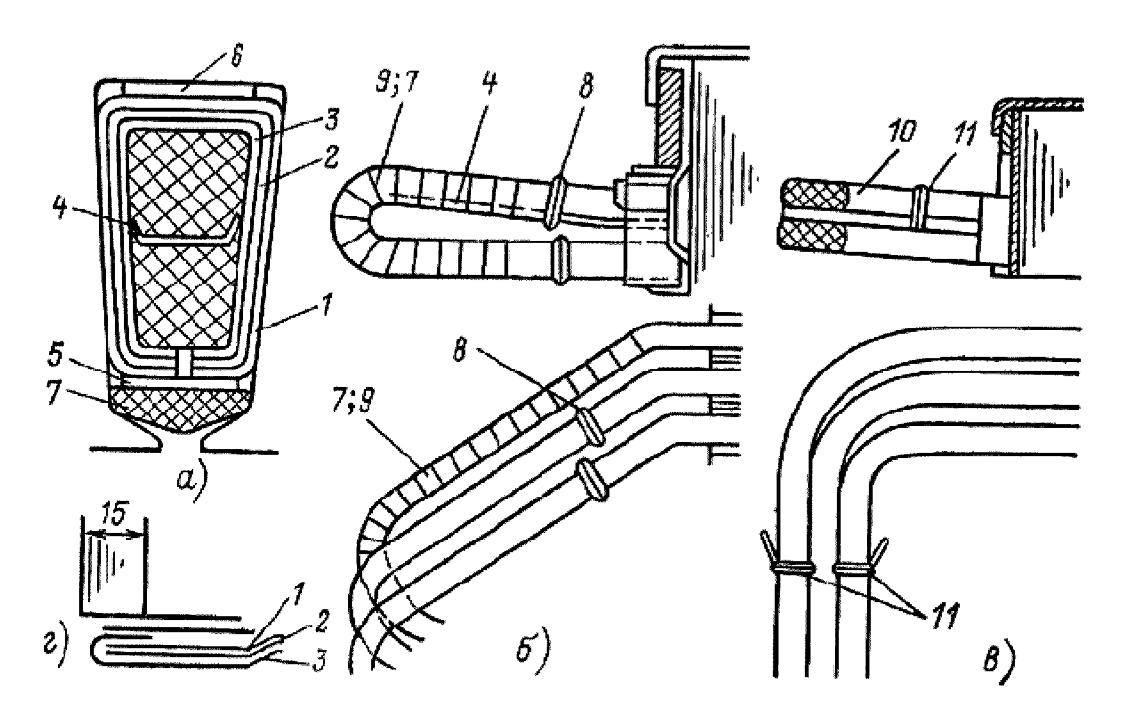


Рис. 98. Изоляция статорных обмоток машин переменного тока мощностью до 100 кВт: а — пазовая часть; б — междуфазная изоляция и изоляция лобовых частей (при катушечной обмотке); в — то же при рамочной обмотке; г — изоляция выхода из паза; 1, 6 — электронит; 2 — гибкий стеклослюдинит; 3, 9 — стеклолакоткань; 4, 10 — гибкий стеклослюдопласт; 5 — стеклотекстолит; 7, 11 — лавсановая лента; 8 — стеклянный чулок

обмотки. Однако она более технологична и дает экономию меди (до 5 %). Двухполюсные машины рекомендуется изготовлять с катушечной обмоткой, т. к. концентрическая менее надежна. На рис. 98 и в табл. 65 представлены материалы для изоляции обмоток статоров мощностью 10–100 кВт.

В случае если это технологически возможно, тройная коробочка (поз. 1–3) может быть заменена одинарной из пленкосинтокартона ПСК-Л или ПСК-Ф толщиной 0,38 мм или лакотканеслюдопласта ГИТ-ЛСБ-ЛСЛ толщиной 0,55. Лакостеклослюдопласт ГИТ-Т-ЛСБ может быть заменен стеклолакорезинослюдопластом ГИТ-Тр-Тр или пленкосинтокартоном ПСК-Л и ПСК-Ф. В машинах тропического исполнения с изоляцией класса нагревостойкости Н целесообразно применять двойную пазовую коробочку, состоящую из лакостекломиканита ГФК-Т-ЛСК толщиной 0,5 мм и стеклолакоткани ЛСП толщиной 0,15 мм с манжетой. В машинах тропического

Таблица 65

Изоляция обмоток статоров асинхронных двигателей и синхронных генераторов мощностью 10–100 кВт (классы нагревостойкости B и F)

Материал				Количество слоев		Толщина изоляции, мм	
Наименование	Марка для классов		Толщина, мм	по ширине	по высоте	по ширине	по высоте
	B	F					
Электронит	—	—	0,2	2	3	0,4	0,6
Гибкий стеклослюдинит	Г2СП	Г2СК	0,2	2	3	0,4	0,6
Стеклолакоткань	ЛСБ	ЛСП	0,15	2	3	0,3	0,45
Гибкий стеклослюдопласт	ГИТ-Т-ЛСБ	ГИТ-Т-ЛСП	0,45	—	1	—	0,45
Стеклотекстолит	СТ	СТЭФ	0,5	—	1	—	0,5
Клин стеклопластиковый	СППП	СППП	Не менее 2,5	—	1	—	—
Лавсановая лента	Тафтяная		0,16	1 вполнахлеста		0,64	0,64
Стеклянный чулок	АСЭЧ(б)	АСЭЧ(б)	—	—	—	—	—

исполнения классов нагревостойкости B и F вместо гибких стеклослюдинитов Г$_2$СП и Г$_2$СК следует применять гибкие стекломиканиты ГФС-ТТ толщиной 0,35 мм, а вместо лакостеклослюдопласта ГИТ-ТТ-ЛСБ — лакостекломиканит ГФК-Т-ЛСК. Внутримашинные соединения следует изолировать трубками на основе нагревостойких резин ТРФ, ТКР и ТКСП. Для выводных концов можно применять: провода ПРГБ и ПВПО для машин с изоляцией классов нагревостойкости B, ПАЛ-130 для машин с изоляцией классов B и F общего назначения, РКГМ и ПВКФ для машин классов B и F и H всех исполнений. Провода ПВШО можно использовать для машин с изоляцией классов нагревостойкости E и B исполнения У, если статоры не пропитываются на вакуумно-пропиточных установках. Место припайки выводного конца к обмотке должно быть

прибандажировано к лобовой части, его следует размещать на расстоянии не менее 50 мм от места отвода гибкой части выводного конца от обмотки. При конструировании машин особое внимание следует обращать на обеспечение минимальной повреждаемости изоляции в процессе укладки. Для этого наряду с усилением изоляции на выходе из паза следует избегать необоснованного завышения коэффициентов его заполнения, что приводит к значительному затруднению укладки. Ширина междуфазных прокладок должна быть больше ширины паза, а размеры пазовых коробочек такими, чтобы изоляция полностью смыкалась под клином и имелся достаточный путь перекрытия на выходе из паза. Пробивное напряжение рекомендуемой пазовой и междуфазной изоляции высокое (не менее 6–8 кВ), и пробои могут происходить только вследствие сдвига, надрыва или прокола изоляции.

Бандажные кольца обмотки статора двухполюсных машин исполнения У класса нагревостойкости А следует изолировать двумя слоями стеклолакоткани марки ЛСЛ; класса нагревостойкости В — двумя слоями микаленты марки ЛФЧ-ББ вполнахлеста и одним слоем стеклянной ленты. Бандажные кольца обмоток статоров двухполюсных машин всех исполнений с изоляцией класса F изолируют микалентой ЛФЭ-ТТ или ЛФС-ТТ и стеклянной лентой, класса Н — микалентой ЛФК-ТТ и стеклянной лентой. Обмотки статоров с нагревами до 140°С следует дважды пропитывать лаком МЛ-92 или МГМ-8 или однократно теми же лаками с повышенным содержанием пленкообразующих при вакуум-нагнетательной пропитке. Обмотки статоров класса нагревостойкости F при применении проводов ПЭТ-155 и ПЭФ-155 следует дважды пропитывать лаком КО-916к или КО-964Н; при применении провода ПСД или ПСДТ обмотки класса нагревостойкости F можно пропитывать лаком ПЭ-933.

4.2.3. Изоляция обмоток статоров асинхронных двигателей и синхронных генераторов мощностью выше 100 кВт на напряжение до 660 В

Для повышения коэффициента заполнения паза статорные обмотки асинхронных двигателей и синхронных генераторов мощностью выше 100 кВт выполняют из прямоугольных эмалированных проводов соответствующего класса нагревостойкости (например,

для класса В марки ПЭТВП). Статорные обмотки асинхронных двигателей мощностью 100–400 кВт на напряжение до 660 В могут подвергаться значительным механическим воздействиям в связи с большими пусковыми токами; катушечные обмотки из проводов прямоугольного сечения повышают надежность двигателей. Наиболее надежны в эксплуатации обмотки с полностью нанесенной на них изоляцией. Эти обмотки укладывают в статоры с открытыми пазами. Более экономичны машины, статоры которых имеют полуоткрытый паз. Однако в этом случае эксплуатационная надежность изоляции ниже, чем в машинах с открытым пазом, т. к. здесь, как и при всыпной обмотке, изолируется не катушка, а паз. В связи с этим такие машины рекомендуется изготовлять только для нормальных условий работы в невлагостойком исполнении. В машинах старых серий катушечные обмотки выполняли из проводов прямоугольного сечения с волокнистой изоляцией марки ПБД (класса нагревостойкости А) или ПСД (класса нагревостойкости В). В связи с тем, что выпуск машин с изоляцией класса нагревостойкости А экономически нецелесообразен, машины новых серий имеют изоляцию классов нагревостойкости В и F.

При выборе проводов и конструкции обмотки следует учитывать возможность невысокой стойкости эмалированных проводов к тепловым ударам и снижения пробивного напряжения и стойкости эмалированной изоляции к растворителям, а также возможность снижения ресурсов обмотки по мере увеличения относительного удлинения провода в обмотке, поэтому следует ограничивать размер в направлении изгиба применяемых эмалированных проводов. Желательно, чтобы узкая сторона проводов была не более 2,44 мм. Относительное удлинение проводов в обмотках рассчитывается по выражению (4.10), но диаметр провода d заменяется размерами проволоки по сторонам a и b в зависимости от направления изгиба. Прямоугольные эмалированные провода менее технологичны, чем провода с волокнистой изоляцией, т. к. они имеют скользкую поверхность. Поэтому для улучшения технологичности намотки нужно стремиться к максимально большей стороне b провода. Желательно, чтобы отношение меньшей стороны к большей было не менее 1:2, а толщина изоляции не менее 0,1 мм (пример зависимости пробивного напряжения проводов от толщины изоляции показан на рис. 98).

Диаметр петли катушки должен быть не менее 25 мм. При этом относительное удлинение в петле первого витка при высоте провода 2,2 мм достигнет 9 %, поэтому следует выбирать провода, срок службы которых не снижается при растяжении (полиэфиримидные, полиэфиримидциануратные).

Витки полукатушки скрепляют лавсановой лентой вразбежку, затем пропитывают лаком (МЛ-92 для класса нагревостойкости В, КО-964Н или КО-916к для классов нагревостойкости F и Н). В машинах тропического и химически стойкого исполнений обмотки лучше изготовлять из проводов ПСД и ПСДК. При этих проводах желательно усиление стекловолокнистой изоляции прокладками из нагревостойких материалов. Дополнительная изоляция между витками в виде прокладок в неизолированной катушке может смещаться, поэтому обмотки, полностью изолированные лентой, более надежны. В случае выполнения полукатушек из проводов со стекловолокнистой изоляцией рекомендуется изолировать головки катушек (через одну) одним слоем стеклолакоткани вполнахлеста под стеклянной лентой. При изолировании паза пробивное напряжение изоляции определяется пробивным напряжением в месте прокола или напряжением перекрытия на выходе из паза, которые намного меньше пробивного напряжения собственно материала изоляции. Напряжение перекрытия пазовой изоляции обмотки статора А-101-8, подвергнутого старению при 130–145°С в течение 40 сут с последующей выдержкой в течение 20 сут в атмосфере 98 % относительной влажности воздуха при 20°С, находилось в пределах 3–6 и 4–6 кВ до увлажнения, что вполне достаточно, т. к. все виды перечисленной изоляции работают при напряжении, не превосходящем 660 В. При применении механически более прочных материалов, не надрывающихся и не прокалывающихся на выходе из паза и более влагостойких, напряжение перекрытия еще выше.

На рис. 99 и в табл. 66 представлена изоляция обмоток с полуоткрытым пазом.

В машинах тропического исполнения классов нагревостойкости В и F лакотканеслюдопласт должен быть заменен лакостекломиканитом ГФГ-Т-ЛСБ и ГФЭ-Т-ЛСП толщиной 0,5 мм, а стеклолакоткань ЛСП — микалентой ЛФС-ТТ или ЛФЭ-ТТ. В машинах исполнения У для изоляции лобовых частей более технологична, чем

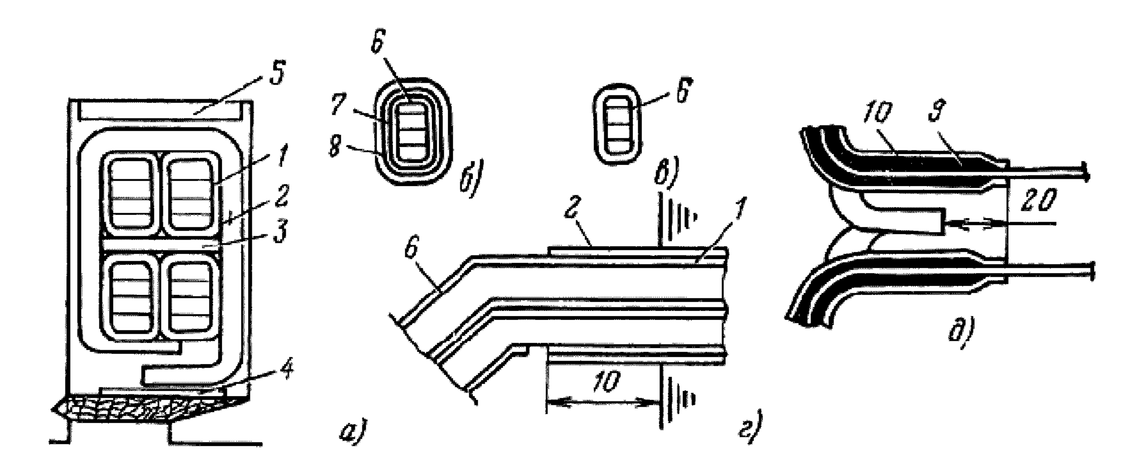


Рис. 99. Изоляция обмоток статоров асинхронных двигателей и синхронных генераторов с полуоткрытым пазом: а — пазовой части; б и в — лобовой части; г — уголков; д — выводных концов; 1 — разбухание изоляции от пропитки; 2 — лакотканеслюдопласт; 3–5 — стеклотекстолит; 6, 8, 10 — лента лавсановая; 7, 9 — стеклолакоткань

стеклолакоткань ЛСП, стеклослюдинитовая лента ЛСПЭ-934тп. Однако в ряде конструкций машин исполнения У достаточно изолировать (скрепить) фазные катушки (первую и последнюю в группе) только лавсановой лентой с последующей пропиткой их лаком, при этом фазные катушки должны иметь толстую изоляцию, что достигается наложением двух слоев лавсановой ленты. Во всех случаях вместо стеклолакоткани и лавсановой ленты выводные концы можно изолировать трубками ТКФ и ТРФ. В машинах тропического исполнения класса нагревостойкости Н для пазовой изоляции применяют лакостекломиканит ЛФК-Т-ЛСК, армированный стеклолакотканью ЛСП толщиной 0,15 мм с манжетой, для прокладок — стеклотекстолит СТК, для изоляции лобовых частей — микаленту ЛФК-ТТ и лавсановую ленту. Полукатушки укладывают в пазы, предварительно скрепив и пропитав витковую изоляцию. Размеры полукатушек (рис. 100) рассчитывают по следующим выражениям.

Размер катушки по ширине, мм:

$$B = (b + d)\,p + t_{пр}\,t^{\pm 0,2}, \qquad (4.13)$$

где $(b + d)$ — размер провода по ширине, мм, принимается по максимальному размеру, указанному в ГОСТ или технических услови-

Таблица 66

Изоляция обмоток статоров классов нагревостойкости B и F на напряжение 660 В с полуоткрытым пазом исполнений У и ХЛ

Часть обмотки	Материал				Число слоев		Толщина изоляции, мм	
	Наименование	Марка для классов		Толщина, мм	по ширине	по высоте	по ширине	по высоте
		B	F					
Пазовая часть:	Разбухание изоляции от пропитки	—	—	—	—	—	0,1	0,3
одна	Лента лавсановая	Тафтяная		0,16	1 вразбежку		0,32	0,32
катушка	Общая изоляция катушки	—	—	—		—	0,42	0,6
паз	Допускаемые отклонения	—	—	—	—	—	±0,2	±0,4
	Лакотканеслюдопласт	ГИТ-ЛСБ-ЛСЛ	0,55	2	3	1,1	1,65	
	Стеклотекстолит	СТ	СТЭФ	0,5	—	1	—	0,5
	Стеклотекстолит	СТ	СТЭФ	0,5	—	1	—	0,5
	Стеклотекстолит	СТ	СТЭФ	0,5	—	1	—	0,5
	Допуск на укладку	—	—	—	—	—	0,3	0,75
	Всего на паз без клина	—	—	—	—	—	2,2	5,2
Лобовая часть	Разбухание изоляции от пропитки	—	—	—	—	—	0,26	0,5
	Лента лавсановая	—	—	0,16	1 встык		0,32	0,32
	Стеклолакоткань	ЛСП	ЛСП	0,15	1 вполнахлеста		0,6	0,6
	Лента лавсановая	Тафтяная		0,16	1 встык		0,32	0,32
	Общая изоляция фазных катушек	—	—	—	—	—	1,5	1,5
Выводные концы	Допускаемые отклонения размеров	—	—	—	—	—	±0,3	±0,5
	Стеклолакоткань	ЛСП	ЛСП	0,15	1 вполнахлеста		—	—
	Лента лавсановая	Тафтяная		0,16	1 вполнахлеста		—	—

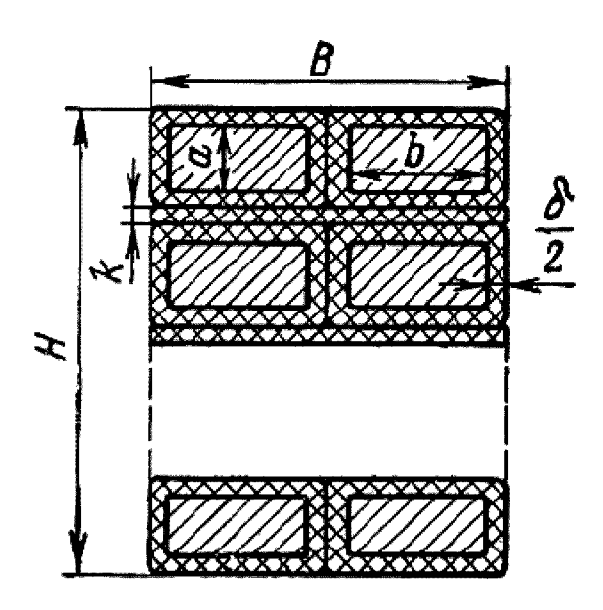


Рис. 100. Витковая изоляция катушечной обмотки электрических машин низкого напряжения

ях на провод; p — число витков по ширине; b — размер проволоки по ширине, мм; d — толщина изоляции по ширине проводника, мм; $t_л$ — разбухание от пропитки, $t_л$ принимается равным 0,1 мм на виток; $t_р$ — двусторонняя толщина обертки пазовой части, мм (для лавсановой ленты 0,32 мм на две стороны); ± 0,2 — допуск на размер по ширине, мм.

Размер катушки по высоте, мм:

$$H = (a + d + r)m + t_{л1}m + t_р \pm 0{,}4, \qquad (4.14)$$

где a — номинальный размер проводника по высоте, мм; r — увеличение толщины по высоте, мм; m — число витков по высоте; $t_{л1}$ — разбухание от пропитки по высоте, принимается равным 0,03 мм для проводов с эмалевой и 0,05 мм для проводов со стекловолокнистой изоляцией.

В случае применения проводов со стекловолокнистой изоляцией следует учитывать увеличение толщины по высоте («бочку») r = 0,03 мм при отношении ширины к высоте до 2; r = 0,08 мм при отношении сторон 2,1—4,0; r = 0,12 мм при отношении сторон более 4. Для проводов с эмалевой изоляцией r = 0.

Размеры паза в свету рассчитывают по следующим выражениям:

– по ширине, мм:

$$B = B' + 22T + 0{,}4 + 2\delta_м, \qquad (4.15)$$

где T — толщина пазовой изоляции, она должна быть для электродвигателей с высотой центров 280–355 мм не менее 0,55 мм; $0{,}4 + 2\delta_м$ — допуск на укладку, мм; $\delta_м$ — допуск на толщину материала, мм;

– по высоте клина, мм:

$$H = H' + 23T + \delta_д + \delta_к + \delta_ф + \delta_у, \qquad (4.16)$$

где $\delta_д$ — толщина прокладки на дно паза, рекомендуется в пределах 0,3–0,5 мм; $\delta_к$ — толщина прокладки под клин, рекомендуется 0,3–0,5 мм; $\delta_ф$ — толщина междуфазной прокладки, должна быть не менее 1,0 мм; $\delta_у$ — допуск на укладку, мм; $\delta_у = 0{,}8 + \Sigma\delta_м$; 0,8 — сумма допусков на размер катушек; $\Sigma\delta_м$ — сумма допусков на толщину материалов пазовой изоляции и прокладок, мм.

Обмотки статоров из эмалированных проводов пропитывают лаком МЛ-92 (класс нагревостойкости B), КО-964Н или КО-916к (классы нагревостойкости F и H). Покрытия пропитанных обмоток из эмалированных проводов покрывными эмалями производить не следует. Обмотки из проводов со стекловолокнистой изоляцией следует пропитывать лаками МЛ-92 (класс нагревостойкости B), ПЭ-933 (класс F), КО-916к или КО-964Н (класс H) и после пропитки покрывать эмалями ГФ-92ГС, ЭП-91 и КО-935 для классов нагревостойкости соответственно B, F и H. При наложении изоляции непосредственно на катушку можно применять различные типы изоляции: гильзовую (пазовая часть изолируется простынкой из листового электроизоляционного материала, а лобовая — ленточной изоляцией вполнахлеста), непрерывную (статорная катушка по всей длине изолируется ленточной изоляцией вполнахлеста). Гильзовая изоляция в зависимости от применяемых материалов может быть «твердой» или «мягкой». Для «твердой» изоляции обычно применяют микафолий или слюдопластофолий — материалы на термореактивных связующих. Материалы наносят на пазовую часть путем обкатки в горячем «утюге» и затем опрессовывают в горячем прессе. До изолирования пазовой части на лобовые части обычно наносят два слоя микаленты или стеклолакоткани и пропитывают (рис. 101 и табл. 67). К недостаткам указанной изоляции нужно отнести хруп-

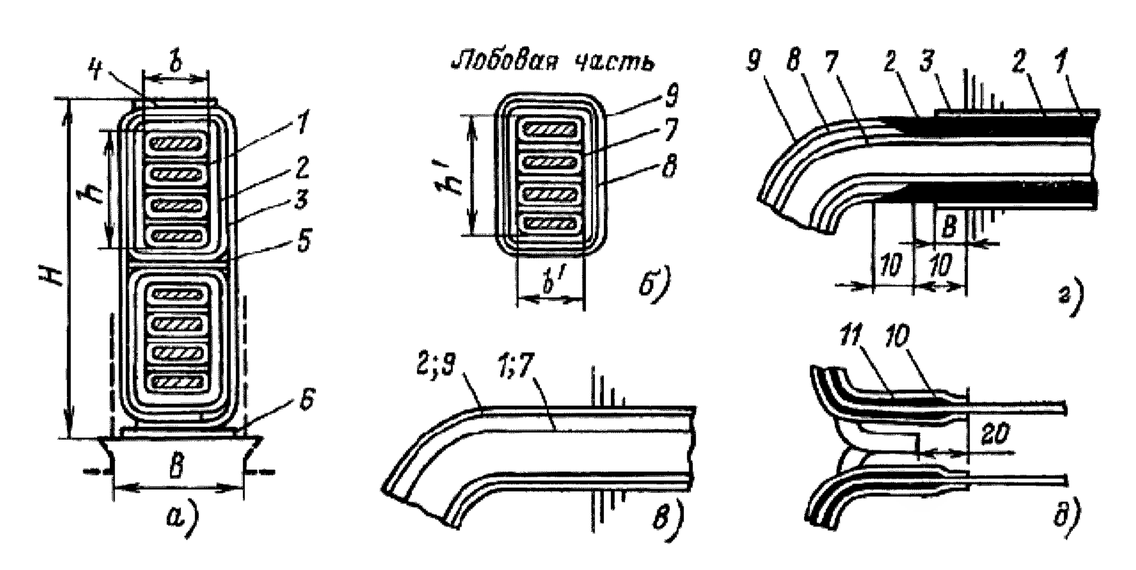


Рис. 101. Изоляция статорных обмоток машин переменного тока мощностью 100–1000 кВт на напряжение до 660 В: а — паза; б — лобовой части; в — уголков для обмоток с непрерывной изоляцией; г — уголков для обмоток с гильзовой изоляцией; д — выводов; 1, 7, 9, 11 — лента лавсановая; 2 — микафолий; 3 — стеклолакоткань; 4–6 — стеклотекстолит; 8, 10 — микалента

Таблица 67

Гильзовая изоляция (твердая гильза) обмоток на напряжение до 660 В для машин исполнений У, Т, химически стойкого и ХЛ (класс В, химически стойкое и тропическое исполнения, классы F и H, все исполнения)

Часть обмотки	Позиция по рисунку 101	Материал	Марка для классов нагревостойкости			Толщина, мм	Количество слоев		Толщина изоляции, мм	
			B	F	H		по ширине	по высоте	по ширине	по высоте
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Пазовая: на катушку	1	Лента лавсановая	Тафтяная	—	—	0,2	1 вразбежку	0,2	0,2	
	2	Микафолий	МФГ-Т	МФП-Т	МФК-Т	0,2	3,5	3,5	1,4	1,4
	—	Общая изоляция катушки	—	—	—	—	—	—	1,6	1,6
	—	Допустимые отклонения	—	—	—	—	—	—	+0,1 –0,4	+0,1 –0,5

Таблица 67 (окончание)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
На паз	3	Стекло-лакоткань	ЛСБ	ЛСП	ЛСП	0,15	2	3	0,30	0,45
	4	Стекло-лакоткань	СТ	СТЭФ	СТК	0,5	—	1	—	0,5
	5	Стекло-лакоткань	ЛСБ	ЛСП	ЛСП	0,15	2	3	0,30	0,45
	6	Стекло-лакоткань	ЛСБ	ЛСП	ЛСП	0,15	2	3	0,30	0,45
		Клин стекло-пластиковый	СППП	СППП	СТК	Не ме-нее 2	—	1	—	3,0
	—	Допуск на укладку	—	—	—	—	—	—	0,3	0,65
	—	Всего на паз без клина	—	—	—	—	—	—	2,2	5,8
Лобо-вая: на катушку	8	Микалента	ЛФС-ТТ	ЛФЭ-ТТ	ЛФК-ТТ	0,13	2 вполнахлеста		1,04	1,04
	7	Лента лавсановая	Тафтяная			0,16	1 вполнахлеста		0,64	0,64
	9	Лента лавсановая	Тафтяная			0,15	1 вразбежку		0,26	0,26
	—	Разбухание изоляции от пропитки	—	—	—	—	—	—	+0,2	–0,5
	—	Допусти-мые откло-нения размеров катушки	—	—	—	—	—	—	±0,5	±0,8
Вывод-ные концы	10	Микалента	ЛФС-ТТ	ЛФЭ-ТТ	ЛФК-ТТ	0,13	2 вполнахлеста		1,04	1,04
	11	Лента лавсановая	Тафтяная			0,16	1 вполнахлеста		0,64	0,64

кость «твердой» гильзы, что вызывает ее повреждаемость при укладке, и трудоемкость изготовления.

Менее трудоемка в изготовлении изоляция в виде «мягкой» гильзы, получаемая обертыванием пазовой части гибким оклеенным миканитом или гибким стекломиканитом с последующим закреплением лентой (табл. 68.1 и 68.2).

Таблица 68.1

Гильзовая изоляция («мягкая» гильза) обмоток машин на напряжение до 660 В исполнений У, Т, ХЛ и химически стойкого

Позиция по рис. 101	Класс В, исполнения У, ХЛ				
	Материал	Марка	Толщина, мм	Количество слоев	Толщина изоляции, мм
1	Гибкий миканит	ГФЧ-ББ	0,2	3,5 оборота	1,4
2	Лента лавсановая	Тафтяная	0,16	1 встык	0,32
—	Общая изоляция катушек	—	—	—	1,7
—	Допустимые отклонения размеров катушек	—	—	—	+0,2 -0,3

Таблица 68.2

Гильзовая изоляция («мягкая» гильза) обмоток машин на напряжение до 660 В исполнений У, Т, ХЛ и химически стойкого

Позиция по рис. 101	Класс В, исполнения химически стойкое и Т, классы F и H, все исполнения						
	Материал	Марка для классов			Толщина, мм	Количество слоев	Толщина изоляции, мм
		B	F	H			
1	Стекломиканит гибкий	ГФС-ТТ	ГФЭ-ТТ	ГФК-ТТ	0,25	3,5 оборота	1,75
2	Лента лавсановая	Тафтяная			0,16	1 встык	0,32
—	Общая изоляция катушек	—	—	—	—	—	2,1
—	Допустимые отклонения размеров катушек	—	—	—	—	—	+0,2 -0,3

Лобовые части и выводные концы катушки изолируют так же, как в катушках с «твердой» гильзой. Хорошее качество «мягкой» гильзы обеспечивается при длине прямой части катушек не более 450 мм.

Следует предостеречь от применения для мягкой гильзы неупругих материалов (стеклолакотканей, гибких стеклослюдинитов и стеклослюдопластов); в этих материалах при нанесении их на обмотку часто образуются морщины и складки, в которых изоляция повреждается, что приводит к ее пробою. По влагостойкости пазовых частей гильзовая изоляция равноценна непрерывной компаундированной, влагостойкость лобовых частей обмоток с гильзой изоляцией ниже, чем с непрерывной (рис. 102, 103). Преимуществами гильзовой изоляции перед непрерывной являются ее меньшая толщина и меньшая трудоемкость изготовления (особенно «мягкой» гильзы), однако в случае требований высокой влагостойкости и механической прочности следует применять непрерывную изоляцию (табл. 69).

Компаундированная изоляция имеет большую толщину, чем гильзовая. Некоторые заводы изолируют обмотки низкого напряжения двумя слоями микаленты ЛФЧ-ББ толщиной 0,17 мм, однако для большей надежности желательно изолировать обмотки тремя слоями этой микаленты, а еще лучше ЛМЧ-ББ толщиной 0,13

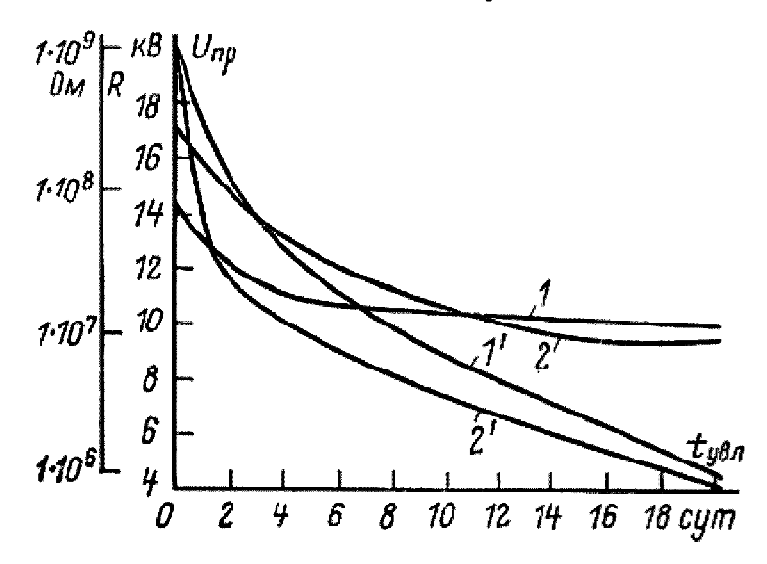


Рис. 102. Зависимость пробивного напряжения (1, 2) и сопротивления изоляции (1´, 2´) пазовой части обмоток на напряжение 660 В от продолжительности пребывания $t_{увл}$ в атмосфере 98-процентной относительной влажности воздуха: 1, 1´ — непрерывная компаундированная изоляция; 2 , 2´ — «мягкая» гильза

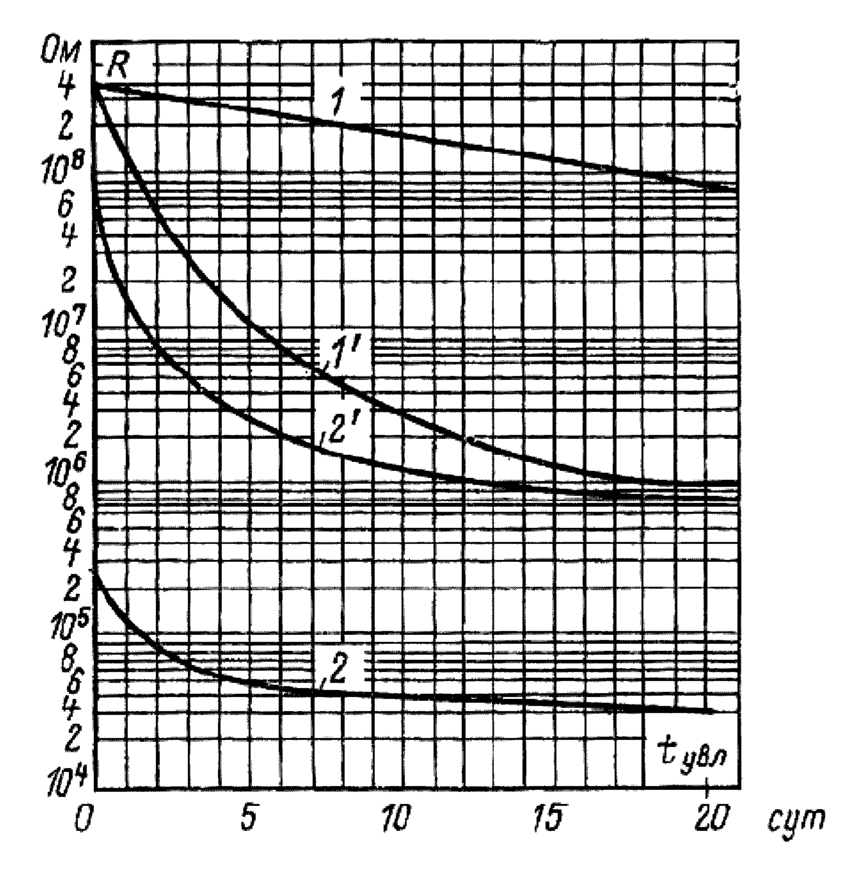


Рис. 103. Зависимость сопротивления изоляции лобовых частей обмоток от времени их пребывания в воде (1, 2) и в атмосфере 98-процентной относительной влажности воздуха (1´, 2´): 1, 1´ — два слоя непрерывной микалентной компаундированной изоляции; 2, 2´ — два слоя стеклоэскапоновой лакоткани (обмотка пропитана лаком БТ-987)

или 0,17 мм. Проведенные опыты показали, что пробивное напряжение двухслойной компаундированной изоляции из микаленты толщиной 0,17 мм колеблется от 4,9 до 20,3 кВ при среднем значении 10,4 кВ, трехслойной из микаленты толщиной 0,13мм — от 19 до 30 кВ при среднем значении 23 кВ.

При работе обмоток в тяжелых условиях, особенно при значительных механических воздействиях, для них следует применять изоляцию на основе сухих стеклослюдопластовых (марки ЛИФ-ТТ) или стеклослюдинитовых лент. После изолирования катушки укладывают в пазы статоров, затем в вакууме и под давлением пропитывают эпоксидным компаундом и запекают. Для статоров больших диаметров катушки пропитывают отдельно и после «вызревания» (отсутствие отлипа на поверхности) укладывают в статор и затем

Таблица 69

Непрерывная изоляция обмоток напряжением до 660 В исполнений У, ХЛ, Т и химически стойкого (класс нагревостойкости В)

Часть обмотки	Позиция по рис. 101	Материал			Количество слоев		Толщина изоляции, мм	
		Наименование	Марка	Толщина, мм	по ширине	по высоте	по ширине	по высоте
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Пазовая: на одну катушку	1	Микалента	ЛМЧ-ББ	0,13	3 вполнахлеста		1,6	1,6
	2	Лента лавсановая	Тафтяная	0,16	1 встык	0,32	0,32	
	—	Разбухание от компаундирования	—	—	—	—	+0,68	+1,08
	—	Общая изоляция	—	—	—	—	2,6	3,0
	—	Допустимые отклонения размеров	—	—	—	—	+0,1 –0,4	+0,2 –0,7
на паз	3	Стеклолакоткань	ЛСБ	0,2	2	3	0,4	0,6
	4	Стеклолакоткань	СТ	0,5	—	1	—	0,5
	5	Стеклолакоткань	СТ	0,5	—	1	—	0,5
	6	Стеклолакоткань	СТ	0,5	—	1	—	0,5
	—	Клин пазовый — стеклотекстолит	СТ	Не менее 3,0	—	1	—	3,0
	—	Допуск на укладку	—	—	—	—	0,3	0,5
Лобовая: на одну катушку	7	Лента лавсановая	Тафтяная	0,16	1 вразбежку		0,32	0,32
	8	Микалента	ЛМЧ-ББ	0,13	3 вполнахлеста		1,6	1,6
	9	Лента лавсановая	Тафтяная	0,16	1 вполнахлеста		0,64	0,64
	—	Разбухание от компаундирования	—	—	—	—	1,04	1,24
	—	Общая изоляция	—	—	—	—	3,6	3,8

Таблица 69 (окончание)

1	2	3	4	5	6	7	8	9
	—	Допустимые отклонения размеров	—	—	—	—	±0,5	–0,5 +1,0
Выводные концы	10	Микалента	ЛМЧ-ББ	0,13	2 вполнахлеста		—	—
	11	Лента лавсановая	Тафтяная	0,16	1 вполнахлеста		—	—

запекают. Такая изоляция типа «монолит» получила особенно широкое распространение для обмоток высокого напряжения. На рис. 104 и в табл. 70 приведены конструктивные данные изоляции на напряжение 660 В.

Соединения между катушками и катушечными группами изолируют: двумя слоями стеклолакотканей ЛСЭ или ЛСЛ толщиной 0,2 мм в машинах с изоляцией класса А исполнения У (допускается применение лакотканей ЛХС ип ЛХЧ); двумя слоями стеклолакоткани ЛСП или микаленты ЛФЧ-ББ в машинах с изоляцией класса нагревостойкости В исполнений У и ХЛ; двумя слоями стеклолако-

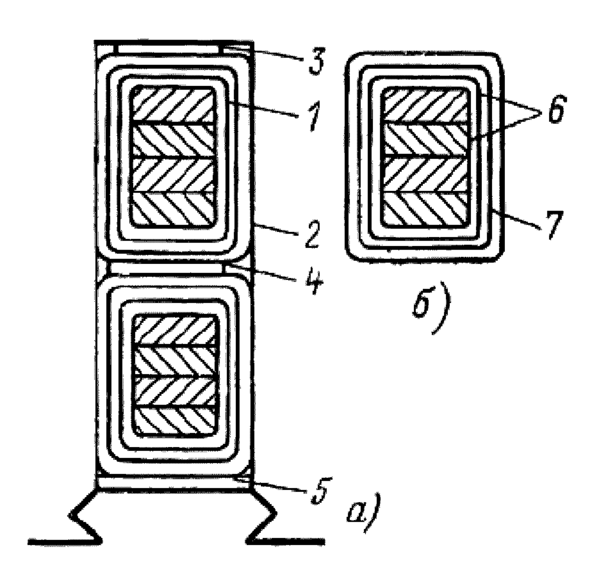


Рис. 104. Изоляция «монолит-3» статорных катушек на напряжение 660 В: а — пазовая часть; б — лобовая часть; 1 — стеклослюдопластовая лента; 2, 7 — лавсановая лента; 3, 4, 5 — стеклотекстолит; 6 — стеклослюдопластовая лента

Таблица 70

Изоляция «монолит-3» катушек на напряжение 660 В

Часть обмотки	Позиция по рис. 104	Материал			Количество слоев по ширине	Толщина, мм	
		Наименование, размер	Марка	Толщина, мм		по ширине	по высоте
Пазовая: на одну катушку	1	Стеклослюдопластовая лента	ЛИР-ТТ	0,14	2 вполнахлеста	1,68	1,68
	2	Лавсановая лента	Тафтяная	0,16	1 встык	0,32	0,32
	—	Разбухание от пропитки	—	—	—	0,8	1,1
	—	Общая изоляция	—	—	—	2,8	3,1
	—	Допускаемые отклонения размеров	—	—	—	+0,1	±0,5
На паз	3	Стеклотекстолит	СТ	0,5	—	—	0,5
	4	Стеклотекстолит	СТ	0,5	—	—	0,5
	5	Стеклотекстолит	СТ	0,5	—	—	0,5
	—	Допуск на укладку	—	—	—	0,3	0,6
	—	Всего на паз без клина	—	—	—	3,1	8,3
Лобовая: на одну катушку							
	6	Стеклослюдопластовая лента	ЛИР-ТТ	0,14	2 вполнахлеста	1,68	1,68
	7	Лавсановая лента	Тафтяная	0,16	1 вполнахлеста	0,64	0,64
	—	Разбухание от пропитки	—	—	—	0,98	1,18
	—	Общая изоляция				3,3	3,5
	—	Допускаемые отклонения размеров	—	—	—	±0,5	±1,0

ткани ЛСТР в машинах с изоляцией классов нагревостойкости B и F исполнений У и T. Применять стеклолакоткань ЛСТР можно только в том случае, если после ее нанесения обмотки запекают. В машинах

исполнений Т и химически стойкого используют микаленту ЛФС-ТТ (классы нагревостойкости В и F) и ЛФК-ТТ (класс Н). Поверх изоляционных лент (кроме ЛСТР) наносят тафтяную (класс А), лавсановую (классы А, В, F и Н). Стеклянную ленту пропитывают лаком КО-916к для уменьшения пыления стекла в ней. Лобовые части обычно привязывают шнуром или стеклочулком к бандажным кольцам, изолированным теми же материалами и при том же количестве слоев, что и внутримашинные соединения. Желательно применять бандажные кольца из стеклопластиков, не требующих дополнительного изолирования. Между внутримашинными соединениями и катушками в лобовых частях обычно ставят прокладки из дерева (двигатели исполнения У класса нагревостойкости А), гетинакса (двигатели исполнения У класса нагревостойкости В и двигатели исполнения ХЛ классов нагревостойкости А и В), стеклотекстолитов марки СТ (двигатели всех исполнений класса нагревостойкости В и двигатели исполнений Т и химически стойкого классов нагревостойкости А и Е), марки СТЭФ (двигатели всех исполнений класса нагревостойкости Н). Допускается для изготовления прокладок применять вместо гетинакса и стеклотекстолита пресс-порошки и пресс-массы соответствующей нагревостойкости: 03-010-02 — для двигателей исполнения У класса нагревостойкости А; ВХ-4-080-34 — для двигателей исполнений Т и химически стойкого классов нагревостойкости А и В; АГ-4 или асбодина — для двигателей всех исполнений классов нагревостойкости В и F. Для выводных концов применяют выводные провода тех же марок, что и в двигателях мощностью до 100 кВт.

4.2.4. Изоляция статорных обмоток асинхронных двигателей и синхронных генераторов мощностью до 100 кВт на напряжение 3300 и 6600 В

К надежности изоляции обмоток электрических машин высокого напряжения предъявляются особенно высокие требования. Катушки высокого напряжения должны плотно лежать в пазу и в лобовой части жестко крепиться к бандажному кольцу и между собой. В противном случае свободно лежащая пазовая часть катушки будет перетираться о стенки паза при тепловом расширении и вибрациях, и на выходе из паза в лобовой части и на бандажном кольце изоляция

будет разрушаться от динамических усилий при изменениях магнитного потока, особенно при пусковых токах. Разрушение будет тем сильнее, чем слабее закреплена обмотка. Изоляция должна иметь достаточную механическую прочность, чтобы не повреждаться при укладке обмотки в машину. Витковая и корпусная изоляция катушек должна иметь высокую электрическую прочность. Достаточная надежность изоляции обмоток высокого напряжения обеспечивается, если она выдерживает напряжения, в 3–4 раза превышающие рабочие. Большой запас электрической прочности изоляции обмотки необходим в связи с тем, что в процессе эксплуатации возникают коммутационные и атмосферные перенапряжения, которые могут значительно превышать рабочее. Электрическая прочность изоляции не должна заметно ухудшаться в процессе длительной эксплуатации машины, когда изоляция будет подвергаться воздействиям высокой температуры, напряжения, влаги и механических факторов. Изоляция должна быть монолитной, что повышает ее стойкость против электрического и теплового старения, влагостойкость, улучшает теплопроводность и механические свойства. Кроме того, немонолитная изоляция, вспухая в машине, перерезается на выходе из паза и в вентиляционных каналах. В немонолитной изоляции наблюдается резкое повышение тангенса угла диэлектрических потерь tg d при повышенных напряжениях (рис. 105) вследствие ионизации воздушных и газовых включений, что приводит к ее дополнительному нагреву, ускоряющему тепловое старение. При ионизации воздуха в пустотах образуются озон и окислы азота, разрушающие изоляцию. Поэтому важно, чтобы она имела низкое значение tg d. Обычно этому требованию удовлетворяют миканитовая и особенно получившие широкое распространение слюдинитовая и слюдопластовая изоляции. Для сохранения монолитности нужно, чтобы при рабочих температурах связующее не вытекало и изоляция не вспухала. Пробой в толще изоляции высокого напряжения обычно идет не по кратчайшему пути, а зигзагообразно, т. к. электрическая прочность при разряде вдоль слоев в десятки раз меньше электрической прочности перпендикулярно кристаллам слюды. При пробое изоляции высокого напряжения последовательно пробивается слой за слоем, причем после пробоя каждого слоя происходит перераспределение напряжения между остальными слоями, и в районе де-

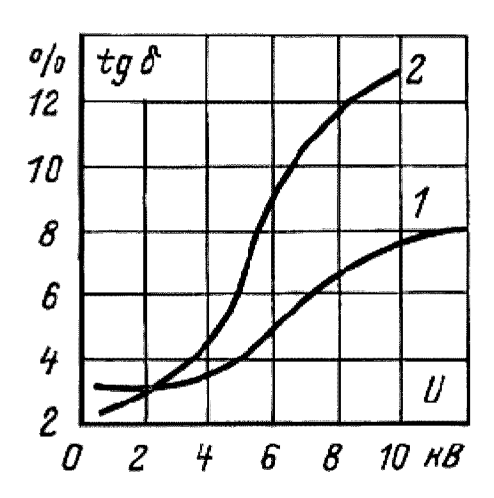


Рис. 105. Кривые ионизации статорных обмоток на напряжение 6600 В:
1 — монолитная изоляция; 2 — немонолитная изоляция

фектного места напряжение повышается. В расслоившейся изоляции между слоями возникают скользящие разряды, длина которых растет с повышением напряжения в пятой степени. По достижении скользящим разрядом дефектного места происходит пробой слоя и перераспределение напряжения. Монолитная изоляция имеет пробивное напряжение обычно в 2–3 раза большее, чем расслоившаяся. Срок службы расслоившейся изоляции при длительном воздействии номинального напряжения значительно меньше, чем монолитной, старение которой в основном происходит вследствие повышения температуры от диэлектрических потерь, т. к. в расслоившейся изоляции, помимо большего повышения температуры от диэлектрических потерь, происходят ионизационные процессы, приводящие к ее пробою.

Машина высокого напряжения с компаундированной обмоткой не должна при перерывах в работе охлаждаться ниже –20 °С. На рис. 106 представлены данные испытаний изоляции катушек на напряжение 3300 В, из которых видно, что неувлажненная микалентная изоляция стойка к воздействию температуры –40 °С, но совместное воздействие влаги, охлаждения и вибрации при пуске машины приводит к резкому снижению электрической прочности изоляции. При конструировании статорных обмоток высокого напряжения важно правильно выбрать сечение элементарных проводников, от чего зависит форма сечения изолированной катушки.

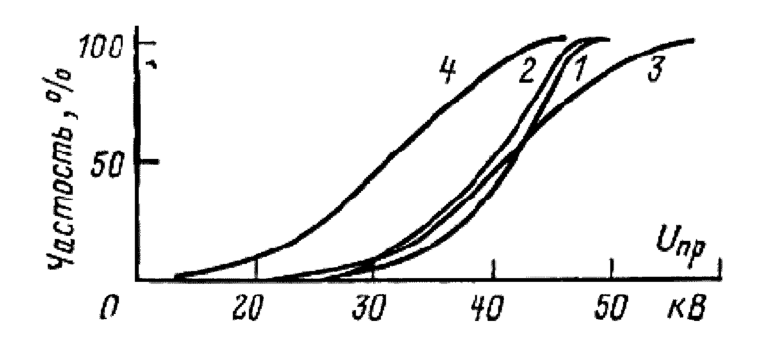


Рис. 106. Распределение пробивных напряжений микалентной компаундированной изоляции катушек на напряжение 3300 В:
1 — в исходном состоянии; 2 — после 10 циклов воздействия отрицательной температуры (–40 °С, 3 ч) и вибраций (30 мин); 3 — после 10 сут пребывания при 105 °С и 20 сут в атмосфере 95–98 % относительной влажности воздуха при 20 °С; 4 — то же, что и 3, но плюс 10 циклов воздействия отрицательной температуры и вибрации

При применении меди с размером широкой стороны до 3,05 мм и сечением, близким к квадрату, усложняется технология намотки катушек из-за тенденции витков к сдвигам ввиду незначительной площади их соприкосновения друг с другом и возникает большая вероятность витковых замыканий. К большим осложнениям приводит применение тонкой меди из-за «ромбовидности» — искажения формы сечения после компаундирования катушек с нанесенной корпусной изоляцией. В результате сдвига витков прямоугольное сечение превращается в ромбовидное (рис. 107) и катушки трудно укладывать в пазы. При укладке ромбовидных катушек усилия почти целиком приходятся на острые углы, где происходит повреждение

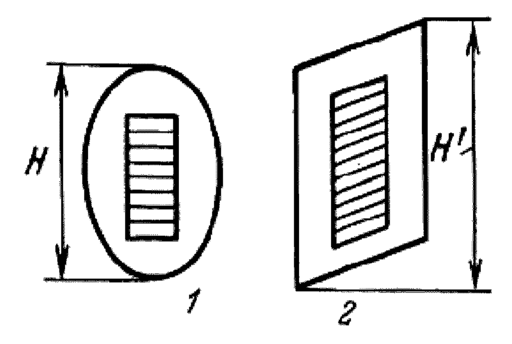


Рис. 107. Изменение сечения катушек высокого напряжения при компаундировании: 1 — до компаундирования; 2 — после компаундирования

изоляции. Ромбовидность сечения проявляется тогда, когда катушки наматывают из тонкой меди. При намотке лодочек и их растягивании и формовке медь получает наклеп, причем внутренние напряжения в меди на прямых частях, в уголках и головках катушек различны. При нагреве катушек до 150–165°C во время компаундирования витки стремятся сдвинуться и искажается форма катушек (угол отгиба лобовой части), что необходимо учитывать при разработке и технологических приспособлений. Ромбовидность после компаундирования получается в катушках, намотанных из меди с узкой стороной 1,0; 1,08; 1,16 мм при отношении ее к широкой стороне более 5. При меньших соотношениях (3; 4) ромбовидность не проявляется. Если по ширине катушки имеются два параллельных витка, ромбовидность наблюдается также при размерах узкой стороны 1,0; 1,08; 1,16 и 1,25 мм в случае, если ширина двух параллельных витков более 5 мм. Ромбовидность сечения не проявляется при узкой стороне меди более 1,35 мм при любом соотношении сторон. Технико-экономические показатели электрических машин высокого напряжения существенно зависят от толщины витковой изоляции катушек. Эту изоляцию стремяться сделать возможно тоньше, но при этом она должна быть достаточно надежной в эксплуатации электрически и механически прочной, влаго- и нагревостойкой. Витковая изоляция должна быть выбрана с учетом витковых перенапряжений, которые могут возникнуть при эксплуатации машины. При выборе витковой изоляции следует учитывать возможность ее повреждения в процессе эксплуатации в результате теплового старения и из-за неравномерности нагрева железа и меди машины, а также из-за механических напряжений. Для гарантии необходимых свойств обмоток высокого напряжения витковая изоляция должна выдерживать испытательные напряжения примерно 1400 В на виток. В связи с тенденцией повышения нагревостойкости изоляции машин высокого напряжения путем применения изоляции на термореактивных связующих разработаны нагревостойкие провода, изолированные стеклослюдинитовой лентой на термореактивном связующем марки ПЛС, которые не требуется при изготовлении катушек компаундировать или дополнительно лакировать для скрепления витков. Толщина витковой изоляции после опрессовывания 0,85 мм. Провода могут быть использованы в машинах с классами

нагревостойкости B и F. В процессе изготовления гильзовой изоляции обмоток из проводов ПЛС температура обмотки должна быть не более 150°С во избежание сдвига ее витков. Некоторые предприятия применяют провод ПЭТВСД, эмалированный полиэтилентерефталатной эмалью и сверху изолированный двумя слоями стекловолокнистой обмотки. Ниже приводится расчет размеров сечения секций, подготовленных под наложение корпусной изоляции, для применяемых типов витковой изоляции:

а) лодочка намотана из проводов ПБД или ПСД с непрерывной дополнительной междувитковой изоляцией, пропитана или компаундирована и опрессована (рис. 108). Ширина B и высота H лодочки равны, мм:

$$B = (b + \delta)p + m + 0{,}03p + 0{,}1;$$
$$H = (a + \delta)n + m + 0{,}03n + 0{,}1, \qquad (4.17)$$

где a и b — размеры неизолированной меди, мм; p — количество витков в лодочке по ширине; m — двусторонняя толщина дополнительной изоляции, мм; n — количество витков по высоте; δ — двусторонняя толщина изоляции провода, мм; 0,03 — разбухание изоляции от пропитки или компаундирования на один виток, мм; 0,1 — разбу-

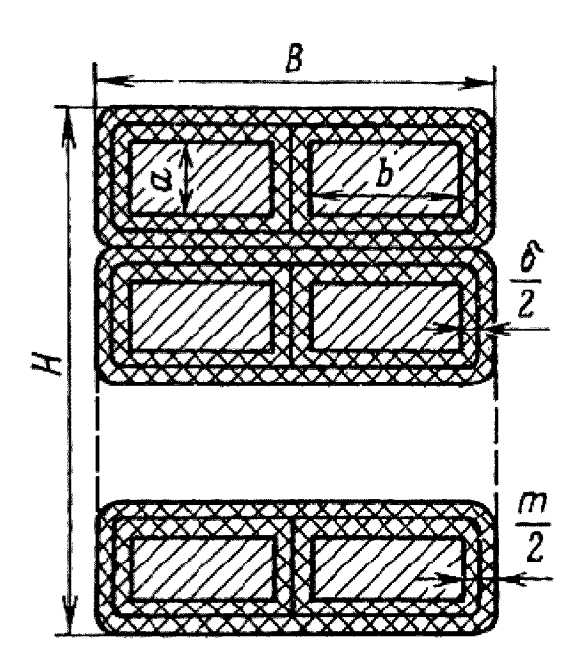


Рис. 108. Катушка обмотки высокого напряжения (витковая изоляция)

хание изоляции от пропитки или компаундирования на поверхности лодочки, мм.

Для непрерывной дополнительной междувитковой изоляции, выполненной в один слой вполнахлеста из слюдопластоленты толщиной 0,1 мм, $\tau = 0{,}4$ мм; для изоляции из микаленты толщиной 0,13 мм $\tau = 0{,}52$ мм.

б) лодочка выполнена из провода ППЛБО, компаундирована и опрессована. Ширина и высота, мм, равны:

$$B = (b + \tau)p + 0{,}075p + 0{,}1;$$
$$H = (a + \tau)n + 0{,}075n + 0{,}1, \tag{4.18}$$

где 0,075 — разбухание изоляции от пропитки или компаундирования на один виток, мм; 0,1 — разбухание изоляции от компаундирования или пропитки на поверхности лодочки, мм.

При наличии по ширине катушек двух параллельных проводников из провода ППЛБО под крайние витки кладут прокладки из электрокартона толщиной 0,2 мм (во избежание сдвига одного ряда проводников по отношению к другому), тогда:

$$H = (a + \tau)n + 0{,}075n + 0{,}1 + 0{,}2 \cdot 2 \tag{4.19}$$

в) лодочка выполнена из провода ПЛС и опрессована. Ширина и высота равны:

$$B = (b + d_1)p + 0{,}2; \tag{4.20}$$

$$H = (a + d_2)n - 0{,}1n + 0{,}2, \tag{4.21}$$

где 0,1 — усадка изоляции от опрессовывания на один виток, мм; 0,2 — разбухание от пропитки лаком, мм.

До последнего времени для корпусной изоляции катушек высокого напряжения применяли материалы на основе слюды. Из двух типов изоляции непрерывная почти целиком вытеснила гильзовую, т. к. она позволяет получить практически равноценную изоляцию всех частей катушки. Электрическая прочность непрерывной изоляции зависит как от ее толщины, так и от качества применяемых материалов, способа их наложения и режима компаундирования (или пропитки и запечки). Для катушек электрических машин мощностью до 500 кВ·А напряжением 3300 и 6600 В применяется микалента из слюды мусковит толщиной 0,17 и 0,13 мм. Микаленту из слю-

ды флогопит можно использовать только в том случае, если она изготовлена из нагревостойкого флогопита, т. к. изоляция катушек, изолированных микалентой из нагревостойкого флогопита, имеет электрическую прочность на 30–40 % ниже, чем на мусковитной микаленте. Микалента толщиной 0,13 мм изготовляется из более крупной (размером 10; 15; 20 мм) слюды мусковит, чем микалента толщиной 0,17 мм (на слюде размером 10; 6 мм). Она стоит дороже, и при ее применении возрастает трудоемкость изолирования, поэтому заводы стремяться использовать микаленту толщиной 0,17 мм. Автоматически заменять микаленту толщиной 0,13 мм микалентой толщиной 0,17 мм нельзя. Такая замена возможна при количестве слоев не менее пяти, когда обеспечивается достаточное перекрытие дефектов микаленты (табл. 71, рис. 109), т. е. для катушек напряжением 6600 В эта замена допустима при толщине микалентной изоляции не менее 4,8 мм на обе стороны.

При толщине изоляции катушек на напряжение 3300 В, 2,8 мм на обе стороны (пять слоев микаленты толщиной 0,13 мм) заменять микаленту толщиной 0,13 мм микалентой толщиной 0,17 мм (четыре слоя) нежелательно, т. к. при этом резко снизится пробивное напряжение пазовой изоляции (рис. 110). Указанная замена допустима только в том случае, если толщина изоляции будет увеличе-

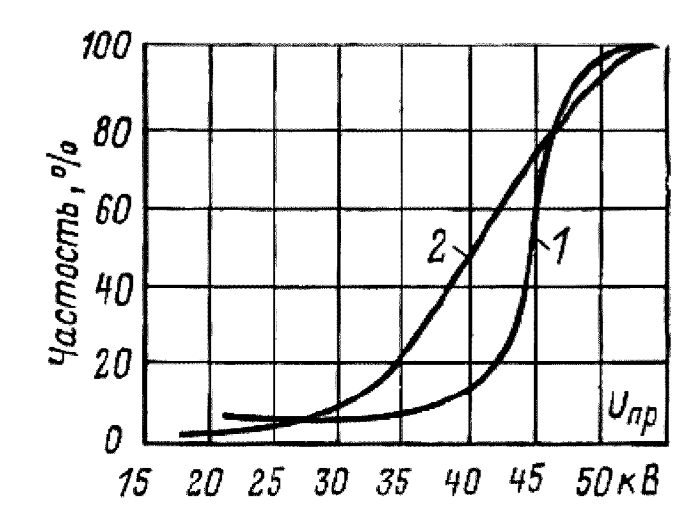


Рис. 109. Пробивное напряжение $U_{пр}$ компаундированной микалентой изоляции на напряжение 6600 В: 1 — неувлажненная изоляция; 2 — изоляция после 38 сут пребывания при 20 °С в атмосфере 98-процентной относительной влажности воздуха

Таблица 71

Электрическая прочность изоляции катушек высокого напряжения, МВ/м

Число слоев	Толщина микаленты, мм	Кратковременное приложение напряжения		Ступенчатое приложение напряжения
		Средняя	Минимальная	
4	0,13	16,7	13,3	10,0
4	0,17	12,5	7,2	10,0
6	0,13	19,0	15,2	12,1
6	0,17	17,7	16,5	11,8
8	0,13	18,6	16,5	11,1
8	0,17	18,3	17,6	10,2

на до 3,4 мм (добавлен один слой). Таким образом, в зависимости от толщины изоляции должна выбираться и толщина микаленты. Большое влияние на электрическую прочность изоляции оказывает способ нанесения микаленты: вручную в полнахлеста или машинный в $2/3$ и в $1/2$ нахлеста. При машинном изолировании в $2/3$ нахлеста электрическая прочность изоляции снижается из-за того, что на катушку накладывается при такой же толщине меньшее число слоев, чем при ручном или машинном изолировании в полнахлеста. Количество стыков при наложении микаленты и слюдопластоленты в $2/3$ нахлеста больше, чем при наложении в полнахлеста, а отрицательный эффект от совпадения стыков (снижение электрической прочности) при меньшем числе слоев микаленты больше. При ма-

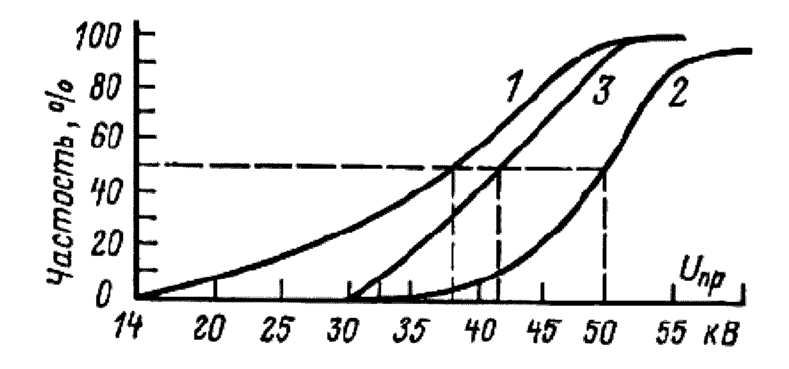


Рис. 110. Распределение значений пробивных напряжений непрерывной изоляции катушек на напряжение 3300 В: 1 — толщина изоляции на обе стороны 2,8 мм (микалента ЛМЧ-ББ толщиной 0,17 мм); 2 — то же (0,13 мм); 3 — толщина изоляции 3,4 мм (микалента толщиной 0,17 мм)

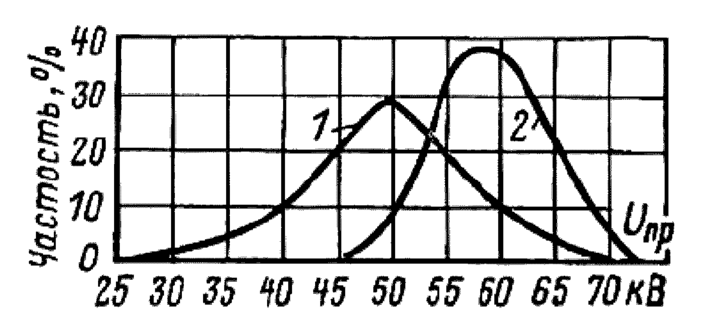


Рис. 111. Пробивное напряжение $U_{пр}$ изоляции катушек на напряжение 6600 В (по 100 катушкам каждого типа изолирования): 1 — машинное изолирование в 2/3 нахлеста; 2 — ручное изолирование вполнахлеста

шинном изолировании в 2/3 нахлеста получается более низкий уровень электрической прочности изоляции. Однако резкое повышение производительности труда и достаточный запас пробивного напряжения (рис. 111) обусловливают все более широкое применение этого способа. Диэлектрические потери непрерывной микалентной изоляции зависят от качества ее изготовления. Плотно намотанная и хорошо компаундированная изоляция имеет высокий тангенс угла диэлектрических потерь tg d — до 10 % и Dtg d — до 5 %. При применении микаленты из нагревостойкого флогопита tg d оказывается выше, чем при использовании микаленты из мусковита. Однако большая эластичность флогопитной микаленты обеспечивает более плотное изолирование катушек и меньшее значение Dtg d (рис. 112). Некачественное компаундирование повышает значение tg d из-за неплотностей в изоляции.

Непрерывная компаундированная микалентная изоляция достаточно короностойка, но имеет ограниченную нагревостойкость. При длительном действии температуры выше 100 °С необходимый срок службы изоляции обмоток высокого напряжения не обеспечивается, несмотря на применение изоляционного материала класса нагревостойкости В (микаленты). Так как изоляция высокого напряжения работает при высоких напряженностях электрического поля и рассчитывается на более длительный срок эксплуатации, чем изоляция низкого напряжения, обмотки высокого напряжения, изолированные микалентой со слюдопластолентой, применяют в электродвигателях с максимальной рабочей температурой при 100 % загрузке до 120 °С, в то время как обмотки низкого напряже-

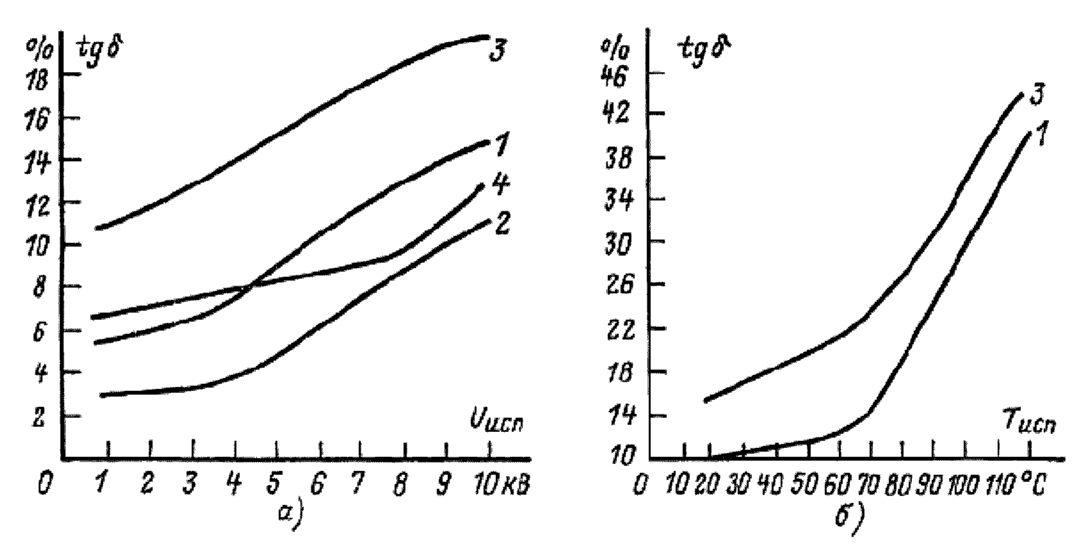


Рис. 112. Зависимость диэлектрических потерь от напряжения $U_{исп}$ (а) и температуры испытания $T_{исп}$ (б) для компаундированной микалентной изоляции на напряжение 6600 В: 1 — катушки изолированы микалентой ЛМЧ-ББ толщиной 0,17 мм в исходном состоянии; 2 — то же после прогрева при 120 °С и последующего охлаждения; 3 — катушки изолированы микалентой ЛФЧ-ББ толщиной 0,17 мм в исходном состоянии; 4 — то же после прогрева при 120 °С и охлаждения

ния с такой же изоляцией — в электродвигателях с рабочей температурой до 130°С. На рис. 113 и в табл. 72 представлены конструкция и показатели изоляции катушек высокого напряжения с микалентной компаундированной изоляцией.

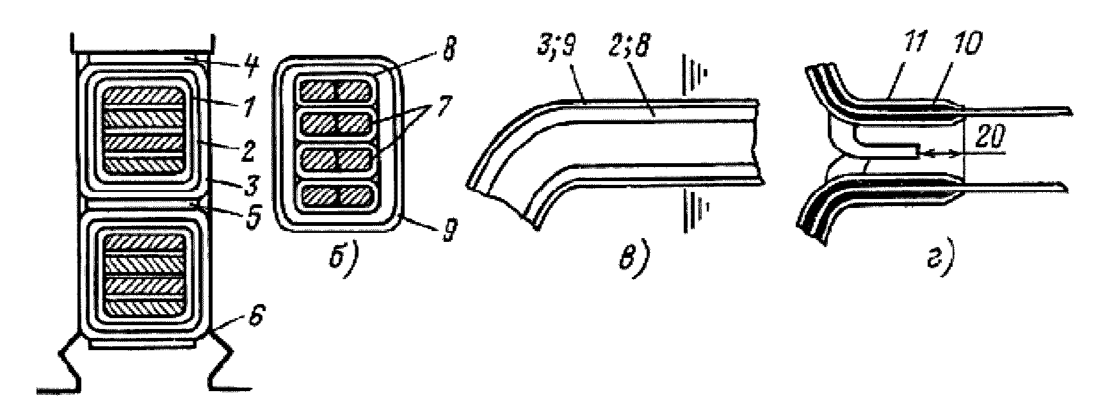


Рис. 113. Непрерывная изоляция статорных обмоток машин переменного тока мощностью 100–1000 кВт на напряжение 6600 В: а — пазовая часть; б — лобовая часть; в — изоляция уголков; г — изоляция выводных концов; 1, 3, 7, 9, 11 — лавсановая лента; 2, 8, 10 — микалента; 4, 5, 6 — стеклотекстолит

Таблица 72

Непрерывная изоляция обмоток статоров машин переменного тока на напряжение 3300 и 6600 В

Часть обмотки	Позиция по рисунку 113	Материал			Для машин на 3300 В				Для машин на 6600 В			
		Наименование	Марка	Толщина, мм	Количество слоев изоляции		Толщина изоляции, мм		Количество слоев изоляции		Толщина изоляции, мм	
					по ширине	по высоте	по ширине	по высоте	по ширине	по высоте	по ширине	по высоте
Пазовая на одну катушку	1	Лавсановая лента	Тафтяная	0,16	1 вразбежку		0,32	0,32	1 вразбежку		0,32	0,32
	2	Микалента	ЛМЧ-ББ	0,13	5 вполнахлеста		2,6	2,6	8 вполнахлеста		4,16	4,16
	3	Лавсановая лента	Тафтяная	0,16	1 встык		0,32	0,32	1 встык		0,32	0,32
	—	Разбухание от компаундирования	—	—	—	—	0,36	2,06	—	—	0,2	2,5
	—	Общая изоляция катушки	—	—	—	—	3,6	5,3	—	—	5,0	7,3
	—	Допустимые отклонения размеров	—	—	—	—	+0,1 –0,4	+0,3 –0,1	—	—	+0,1 –0,4	+0,5 –1,2
	4	Стеклотекстолит	СТ	0,5	—	1	—	0,5	—	1	—	0,5
	5	Стеклотекстолит	СТ	1,0	—	1	—	1,0	—	1	—	1,0
	6	Стеклотекстолит	СТ	0,5	—	1	—	0,5	—	1	—	0,5
	—	Допуск на укладку	—	—	—	—	0,3	0,5	—	—	0,3	0,5
	—	Всего на паз без клина	—	—	—	—	4,0	13,1	—	—	5,4	17,3

Таблица 72 (окончание)

Часть обмотки	Позиция по рисунку 113	Материал			Для машин на 3300 В				Для машин на 6600 В			
		Наименование	Марка	Толщина, мм	Количество слоев изоляции		Толщина изоляции, мм		Количество слоев изоляции		Толщина изоляции, мм	
					по ширине	по высоте	по ширине	по высоте	по ширине	по высоте	по ширине	по высоте
Лобовая на одну катушку	7	Лавсановая лента	Тафтяная	0,16	1 встык		0,32	0,32	1 встык		0,32	0,32
	8	Микалента	ЛМЧ-ББ	0,13	5 вполнахлеста		2,6	2,6	7 вполнахлеста		3,64	3,64
	9	Лавсановая лента	—	0,16	1 вполнахлеста		0,64	0,64	1 вполнахлеста		0,64	0,64
	—	Разбухание на компаундирование	—	—	—	—	0,94	2,24	—	—	0,5	3,0
	—	Общая изоляция катушки	—	—	—	—	4,5	5,8	—	—	5,1	7,6
	—	Допустимые отклонения размеров	—	—	—	—	±0,5	±1,0	—	—	±0,5	±1,5
Выводные концы	10	Микалента	ЛМЧ-ББ	0,13	4 вполнахлеста		—	—	7 вполнахлеста		—	—
	11	Лавсановая лента	Тафтяная	0,16	1 вполнахлеста		—	—	1 вполнахлеста		—	—

В связи с тем, что к надежности изоляции высокого напряжения предъявляются особенно высокие требования, многие годы единственным видом такой изоляции была слюдяная. Однако в связи с высокой стоимостью слюды в пластинках большой площади, неоднородностью микалентной слюдяной изоляции и фактическим отсутствием изоляции высокого напряжения класса нагревостойкости В возникла необходимость создания новых видов изоляции обмоток высокого напряжения. Была разработана изоляция в основном на основе слюдинитовых и слюдопластовых материалов. Изоляция на напряжение 6600 В из липкой эскапоновой стеклолакоткани оказалась неперспективной, т. к. она подвержена более быстрому тепловому и электрическому старению, чем микалентная компаундированная, и менее влагостойка (рис. 114–117). Применение при ремонте обмоток эскапоновой стеклолакоткани в правильном сочетании с микалентной изоляцией поможет решить вопрос частичной замены микаленты без снижения качества изоляции обмотки. Предложен способ градирования изоляции путем сочетания материалов с различными значениями диэлектрической проницаемости. При применении во внешних слоях обмотки материала с меньшей диэлектрической проницаемостью — эскапоновой стеклолакоткани с е = 3,5 , а во внутренних — микалентной изоляции с вдвое боль-

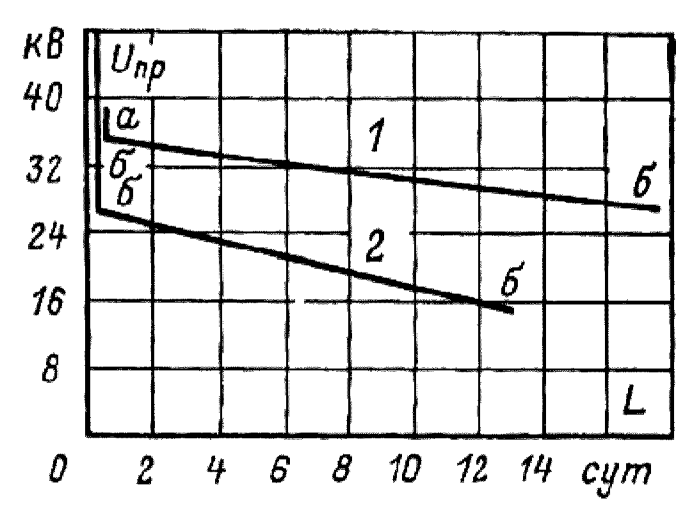


Рис. 114. Изменение пробивного напряжения $U_{пр}$ от воздействия ударных нагрузок у микалентной компаундированной (1) и эскапоновой (2) изоляции в процессе теплового старения (изоляция из четырех слоев микаленты толщиной 0,17 мм или липкой эскапоновой стеклолакоткани толщиной 0,19 мм): а — до воздействия ударов; б — после воздействия ударов

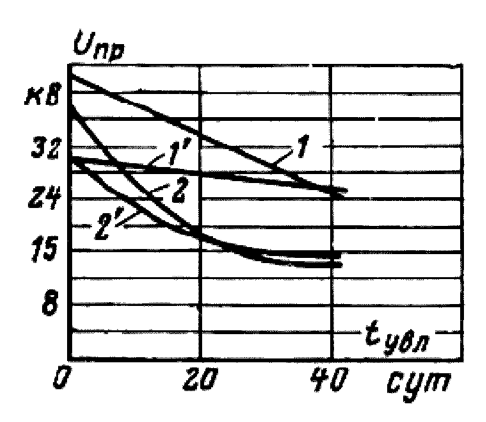


Рис. 115. Зависимость пробивного напряжения $U_{пр}$ изоляции катушек на напряжение 3300 В от времени пребывания $t_{увл}$ в атмосфере 98-процентной относительной влажности воздуха: 1, 1′ — микалентная компаундированная изоляция; 2, 2′ — эскапоновая компаундированная изоляция; 1, 2 — до укладки; 1′, 2′ — после укладки и извлечения из статора

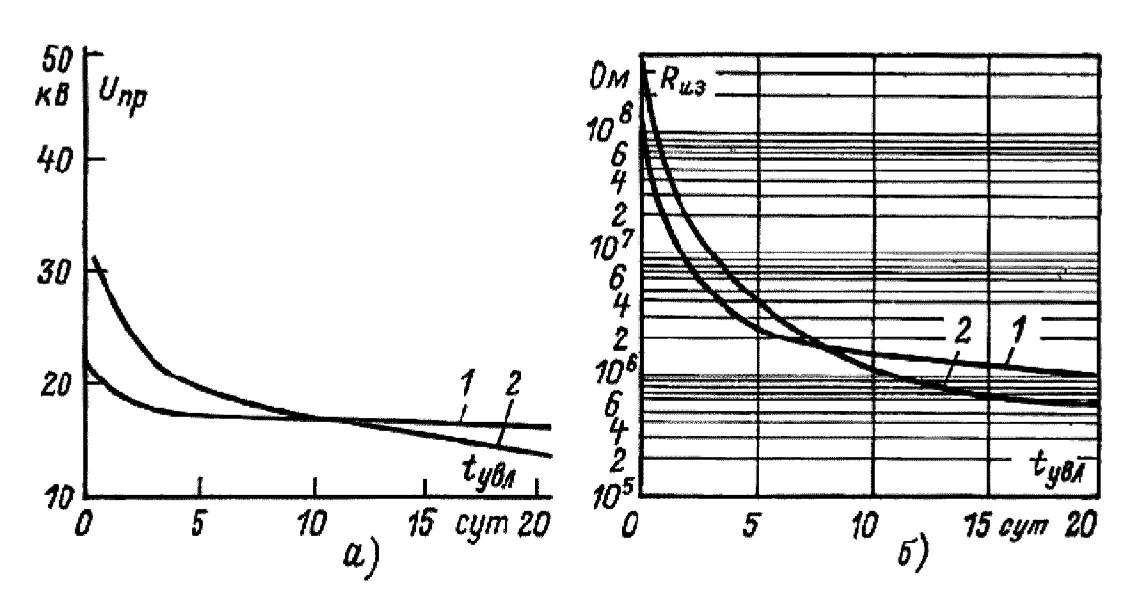


Рис. 116. Зависимость пробивного напряжения $U_{пр}$ (а) и сопротивления изоляции $R_{из}$ (б) катушек от времени пребывания $t_{увл}$ в атмосфере 98-процентной относительной влажности воздуха: 1 — изоляция из трех слоев вполнахлеста микаленты толщиной 0,17 мм компаундированная; 2 — изоляция из трех слоев вполнахлеста липкой эскапоновой стеклолакоткани толщиной 0,19 мм компаундированная

шей диэлектрической проницаемостью напряженность электрического поля по толщине изоляции выравнивается (рис. 118). При этом ослабевают ионизационные процессы в изоляции и увеличивается срок ее службы. На ряде заводов вместо чисто микалентной

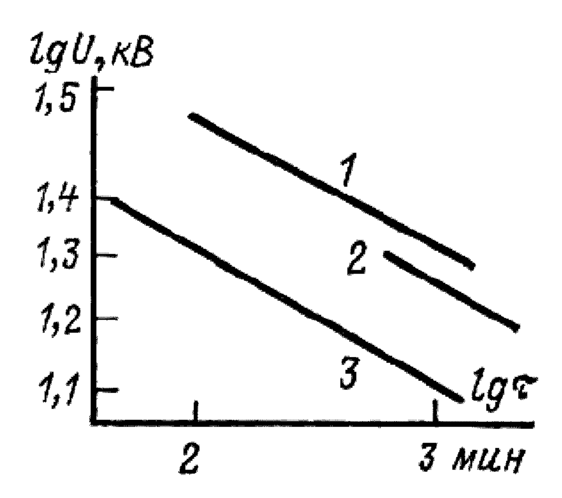


Рис. 117. Срок службы изоляции катушек на напряжение 6600 В:
1 — микалентная изоляция в исходном состоянии; 2 — стеклоэскапоновая изоляция в исходном состоянии; 3 — то же после старения при 150 °С в течение 16 сут

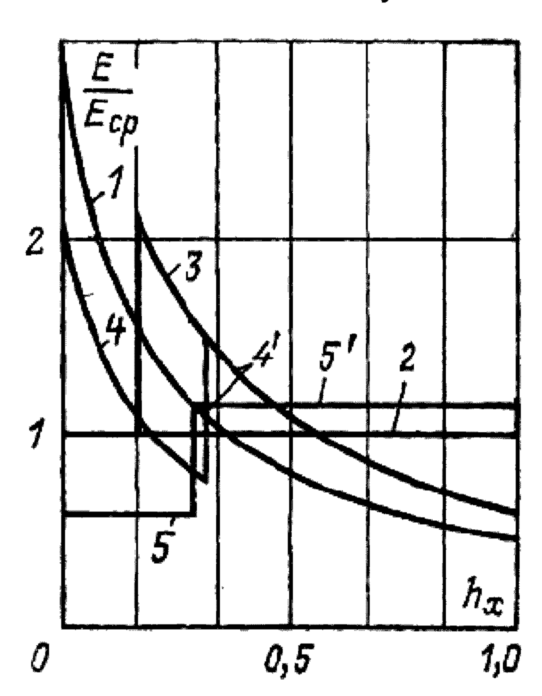


Рис. 118. Распределение напряженности электрического поля E в зависимости от толщины компонентов изоляции: 1 — микалентная изоляция на углу обмотки; 2 — то же на плоской части; 3 — градированная изоляция при $E_{пр1}/E_{пр2}$×1,0 на углу обмотки; 4, 4′ — то же при $E_{пр1}/E_{пр2}$ = 1,5; 5, 5′ — градированная изоляция на плоскости стержня; 4, 5 — напряженность в микалентной изоляции; 4′, 5′ — напряженность в стеклоэскапоновой изоляции; $E_{пр1}$ и $E_{пр2}$ — напряженности первого и второго слоев

применяют компаундированную микалентно-слюдопластовую изоляцию. Пазовую и лобовую части катушек изолируют через слой микалентной и слюдопластолентной ЛИФЧ-ББ. Первый и последний слои в пазовой части следует выполнять микалентой. Слюдопластовая лента ЛИФЧ-ББ более эластична и имеет по сравнению с микалентной ЛМЧ-ББ гораздо большую однородность по толщине и пробивному напряжению, что обеспечивает равномерность толщины и достаточную электрическую прочность изоляции обмоток. Средние значения пробивных напряжений слюдопластовых лент в отличие от микаленты снижаются при приложении растягивающих усилий. Однако изгибающие усилия при изолировании меньше влияют на электрическую прочность слюдопластовых лент, чем микаленты. При применении слюдопластовых лент следует тщательно отрабатывать технологию изолирования обмоток. Для выбора оптимальной технологии изготовления корпусной изоляции на основе слюдопластовых лент ЛИФЧ-ББ проводились испытания изоляции в макетах на ударное смятие (имитация воздействий на изоляцию обмоток при укладке в пазы статора и в процессе эксплуатации), которые показали (табл. 73), что изоляция на основе слюдопластовых лент меньше повреждается при ударных воздействиях, чем изоляция на основе микаленты. Проверка относительной повреждаемости изоляции лобовых частей при укладке катушек (при прибандажиро-

Таблица 73

Стойкость изоляции к ударному смятию

Материал	Толщина изоляции, мм		Пробивное напряжение, кВ					
			в исходном состоянии		после воздействия 8000 ударов при температуре, °С			
					20		105	
	среднее	минимальное	среднее	минимальное	среднее	минимальное	среднее	минимальное
Микалента ЛМЧ-ББ	5,1	5,0	40,6	32	33,0	19	26,0	8
Слюдопластовая лента ЛИФЧ-ББ	4,9	4,5	49,3	44	38,5	27	35,6	16
Слюдопластовая лента ЛИМЧ-ББ	5,5	5,2	61,5	58	41,5	30	27,7	16

вании их к бандажному кольцу) путем испытаний изоляции макетов на стойкость к изгибающим усилиям показала, что при изгибании вокруг макета при различных температурах слюдопластовая изоляция повреждается больше, чем микалентная (рис. 119).

Изоляция из слюдопластовой ленты плохо высыхает. При ее применении вместо микаленты продолжительность компаундирования должна быть увеличена в 1,5 раза. Поскольку удлинение процесса компаундирования нежелательно, то изоляцию выполняют комбинированной. Наличие упругой микаленты облегчает проникновение битума и обеспечивает лучшее высыхание изоляции при компаундировании, благодаря чему tg d и Dtg d комбинированной изоляции ниже, чем чисто слюдопластовой (рис. 120). Кроме того, комбинированная изоляция более стойка к изгибающим усилиям, чем чисто слюдопластовая, и имеет больший срок службы при длительном воздействии напряжения (рис. 121 и табл. 74).

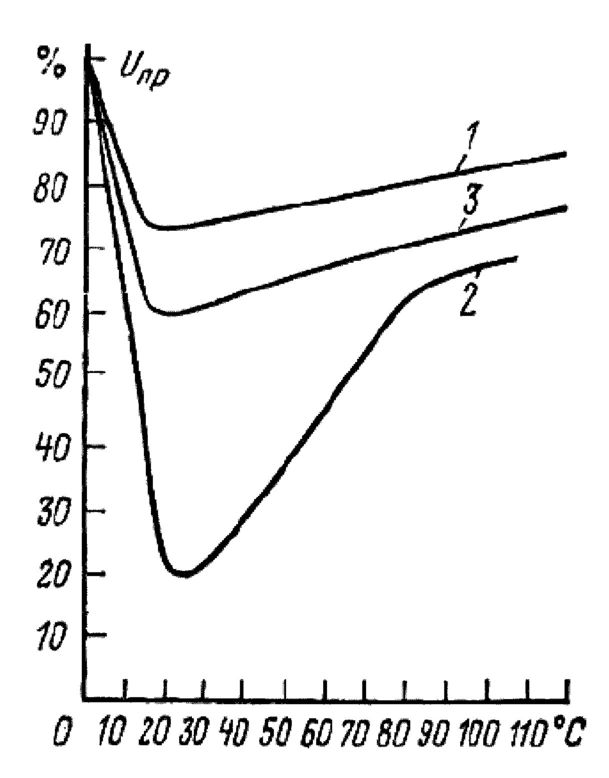


Рис. 119. Зависимость пробивного напряжения $U_{пр}$ изоляции стержней (% к исходному) после изгибания их вокруг макета диаметром 460 мм от температуры: 1 — микалентная изоляция; 2 — слюдопластовая ЛИФЧ-ББ; 3 — комбинированная

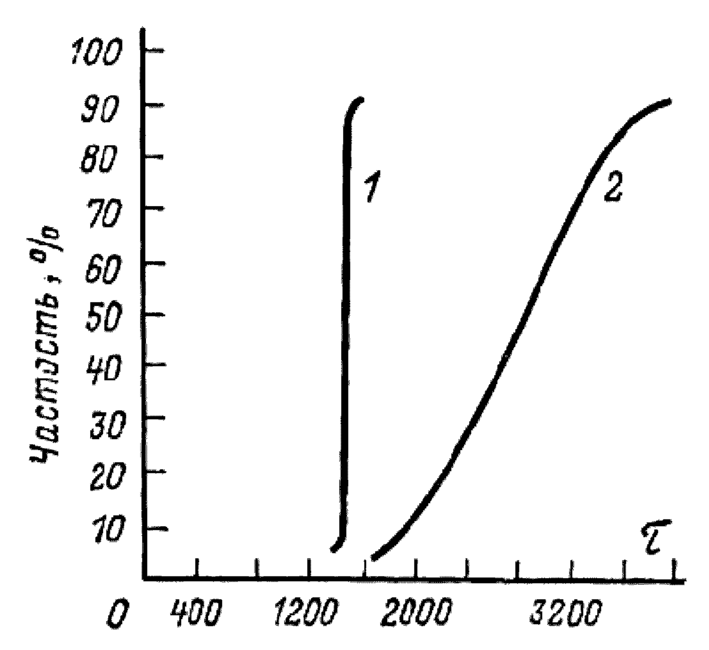


Рис. 120. Зависимость tg δ от напряжения (а) и температуры (б):
Изоляция на основе: 1 — мика ленты ЛМЧ-ББ толщин ой 0,17 мм;
2 — слюдопластовой ленты ЛИМЧ-ББ; 3 — слюдопластовой ленты на вермикулите ; 4 — слюдопластовой ленты ЛИФЧ-ББ; 5 — комбинированная изоляция (микалента ЛМЧ-ББ и слюдопластовая лента ЛИФЧ-ББ через слой)

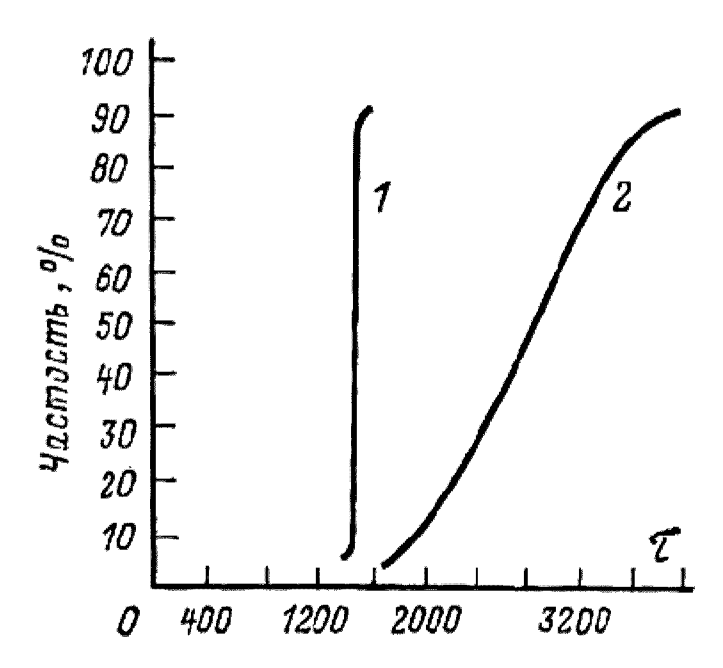


Рис. 121. Срок службы микалентной и комбинированной изоляции при длительном воздействии напря жения 18 кВ част отой 50 Гц:
1 — мика лентная изоляци я; 2 — комбинированная

Таблица 74

Испытание изоляции повышенным напряжением

Изоляция	Ступень подъема напряжения, ч	50-процентное значение пробивного напряжения, кВ	Время до пробоя, ч
Микалентная компаундированная	2	22	—
	24	17	—
	132	15	—
	Непрерывно	18	1520
Комбинированная микалентно-слюдопластовая (через слой) компаундированная	2	26	—
	24	21	—
	132	19	—
	Непрерывно	18	2200

При конструировании обмоток с компаундированной микалентной и комбинированной изоляцией следует учесть, что разбухание корпусной изоляции от компаундирования для катушек на напряжение 3300 и 6600 В различно по ширине и высоте катушки зависит от соотношения ширины и высоты лодочки. Такое различие обусловлено тем, что при гигростатическом опрессовывании изоляции во время компаундирования обеспечивается равное давление на единицу площади любой части катушки, общее давление на сторону тем больше, чем больше ее площадь; из-за разницы общих давлений на стороны катушки изоляция на широкой стороне прижимается, а на узкой выпучивается (чему также способствует упругость слюды). Чем больше отношение между площадями сторон, тем более выпучивается изоляция на узкой стороне. Закономерность изменения припусков на компаундирование для корпусной микалентной и комбинированной изоляции в зависимости от соотношения высоты и ширины лодочки для катушек на напряжение 3300 и 6600 В представлена на рис. 122. Расчет сечения изолированных катушек по ширине B' и по высоте H' мм, и соответственно двусторонней толщины корпусной изоляции t_1 и t_2, мм (рис. 123), производят следующим образом:

$$B' = (B + t_1)^{+0,1}_{-0,4}; \quad t_1 = \Delta + \Delta_{мл} + \Delta t;$$
$$H' = (H + t_2)^{+r_1}_{-r_2}; \quad t_2 = \Delta + \Delta_{мл} + \Delta h, \qquad (4.22)$$

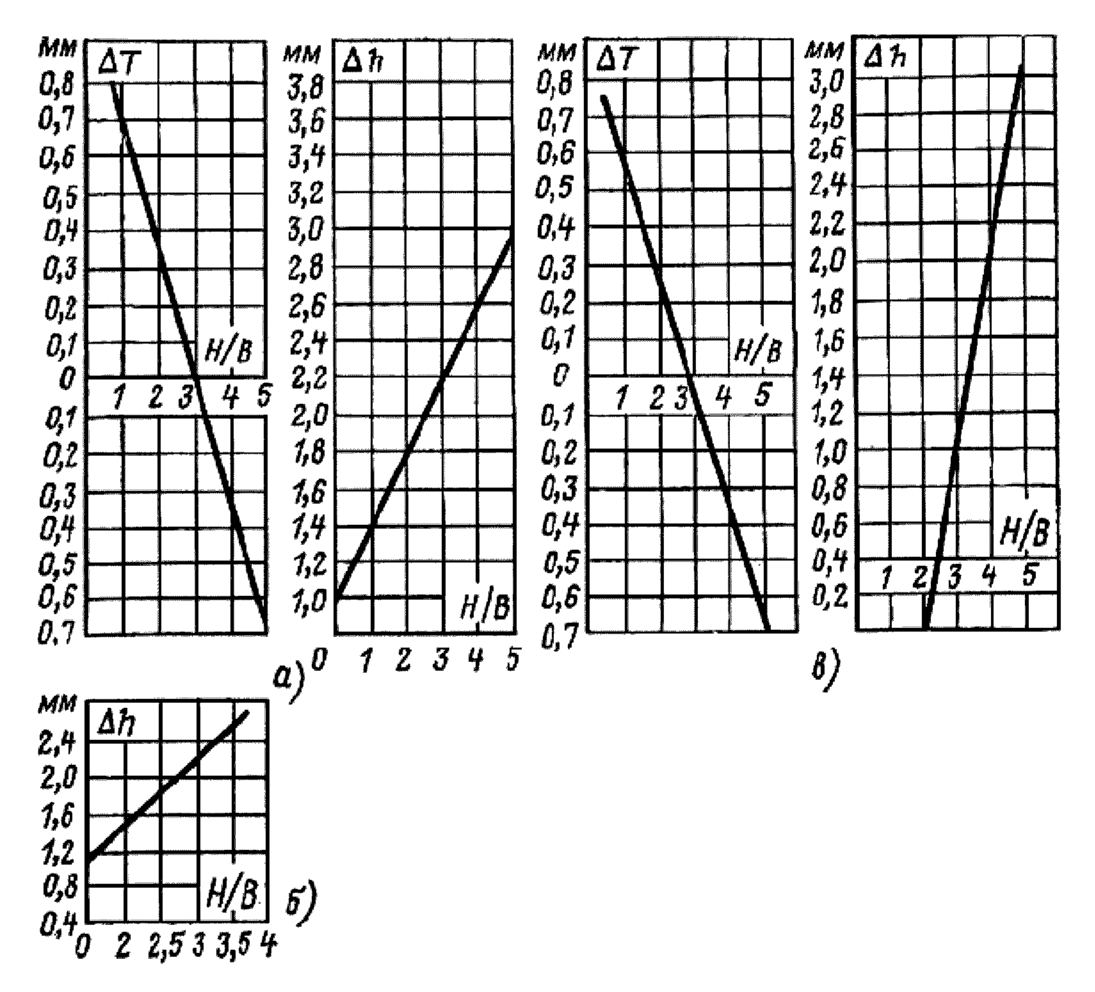
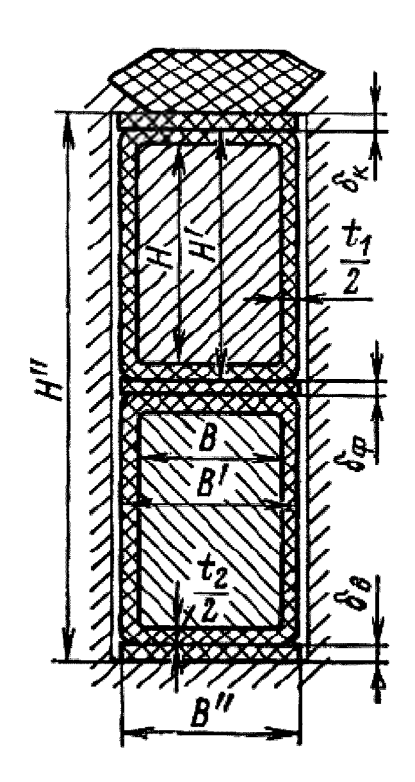


Рис. 122. Усредненные значения изменения размеров после компаундирования корпусной изоляции катушек: а — на 6600 В изолированных микалентой, двусторонняя толщина 4,7–5,4 мм; б — на 3300 В, изолированных микалентой, двусторонняя толщина 2,8–3,4 мм; в — на 6600 В, изолированных микалентой ЛМЧ-ББ и слюдопластолентой ЛИФЧ-ББ (через слой), общая двусторонняя толщина 4,7 мм

где H — размер катушки без корпусной изоляции по высоте, мм; B — размер катушки без корпусной изоляции по ширине, мм; Dм — толщина основной изоляции (микалентной, слюдопластовой и др.), мм; Dл — толщина слоя защитной ленты (лавсановой, стеклянной), мм; Δt — величина, определяющая изменения размеров изоляции по ширине после компаундирования, мм; Dh — величина определяющая изменения размеров изоляции по высоте после компаундирования, мм; r_1 — плюсовый допуск на высоту; r_2 — минусовый допуск на высоту.



Для катушек на напряжение 3300 В с микалентной изоляцией толщина основной изоляции $\Delta м = 2{,}8 \div 3{,}2$ мм; $\Delta t = 0{,}7$ мм; значение Δh определяют из рис. 122 в зависимости от конфигурации сечения. Для катушек на напряжение 6600 В $\Delta м = 4{,}7 \div 5{,}4$ мм Δt и Δh определяют из рис. 123.

Если в катушках на напряжение 6600 В Δt имеет отрицательные значения, то при расчете t_1 принимают $\Delta t = +(4{,}7 \ldots)$, причем берут абсолютное значение Δt; r_1 — принимают равным: для катушек на напряжение 6600 В — 0,5 мм, 3300 В — 0,3 мм; r_2 — для катушек на напряжение 6600 В — 1,2 мм, 3300 В — 1,0 мм.

При расчете размера паза в свету берут номинальные значения для B'' и H''. При укладке в пазы нагретая изоляция катушек осаживается по высоте приблизительно на $0{,}3\,\Delta h$, что учитывают при расчете размера паза в свету по высоте. Ширину B'' и высоту H'' находят по выражениям:

$$' = \quad ' +$$

$$' = \quad '$$

где $d_д$ — толщина прокладок на дно паза, мм; $d_ф$ — толщина прокладок между катушками, мм; $d_к$ — толщина прокладок под клин, мм; 0,3 — припуск на укладку по ширине, мм; 0,5 — припуск на укладку по высоте, мм.

До последнего времени ремонтные организации изготовляют катушки высокого напряжения с гильзовой изоляцией. Тенденция возвращения к гильзовой изоляции наблюдается и при разработке новых типов изоляции катушек высокого напряжения с утоньщенной изоляцией и повышенной нагревостойкостью (например, при применении слюдотерма). В таких катушках при высоких электрической и механической прочности, нагрево- и влагостойкости пазовой части оказываются ослабленными места стыка и лобовая часть, которые в процессе эксплуатации претерпевают наибольшие механические деформации и увлажнение. Наличие различных типов изоляции по длине катушки с гильзовой изоляцией приводит к неравномерности пробивного напряжения в различных ее частях (рис. 124). При 105 °C пробивное напряжение непрерывной изоляции или гильзовой из микафолия на 10–15 % ниже, чем при 20 °C; изоляция лобовых частей катушек с гильзовой изоляцией, выполненная из лакоткани, при 105 °C имеет пробивное напряжение на 50 % ниже, чем

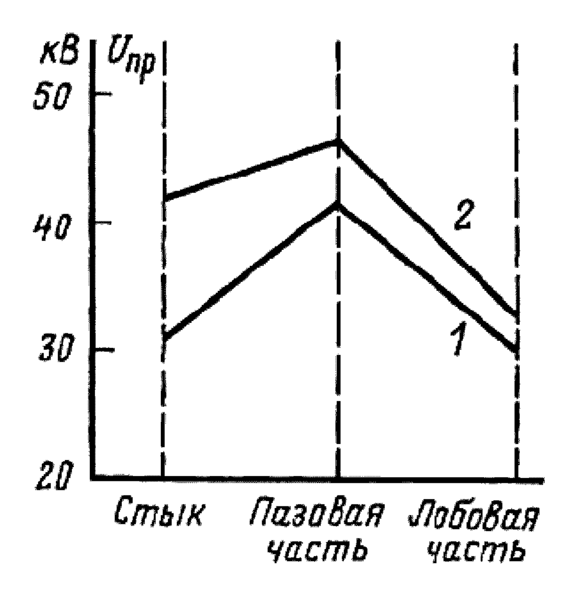


Рис. 124. Пробивное напряжение $U_{пр}$ гильзовой и непрерывной изоляции катушек электродвигателей на напряжение 3300 В (после укладки и извлечения из статора): 1 — катушка с гильзовой изоляцией; 2 — катушки с непрерывной микалентной изоляцией (значения 50 % вероятности)

при 20°C. Микафолиевая изоляция при укладке повреждается значительно, и снижение пробивного напряжения достигает 40–50 %, микалентная компаундированная изоляция повреждается незначительно (снижение 10–15 %). В микафолиевой изоляции диэлектрические потери зависят от качества микафолия и плотности его нанесения на катушку. Обычно при 20°C качественные микафолиевая и компаундированная микалентная изоляции имеют диэлектрические потери одного порядка, но при нагреве значение тангенса угла диэлектрических потерь у микафолиевой изоляции резко повышается вследствие разбухания изоляции, а так же из-за увеличения потерь в связующем (рис. 125). Шеллак и глифталевая смола, применяемые обычно для клейки микафолия, не короностойки, поэтому микафолиевая изоляция подвержена электрическому старению значительно больше, чем микалентная компаундированная. Обмотка с непрерывной микалентной изоляцией имеет высокую влагостойкость, значительно превосходящую влагостойкость обмотки с гильзовой изоляцией. Стык пазовой гильзы и изоляции лобовой части (место ее ослабления) следует максимально отдалять от стали статора и, следовательно, удлинять прямую часть катушки. В связи с этим применять гильзовую изоляцию для обмоток на напряжение 6600 В нежелательно.

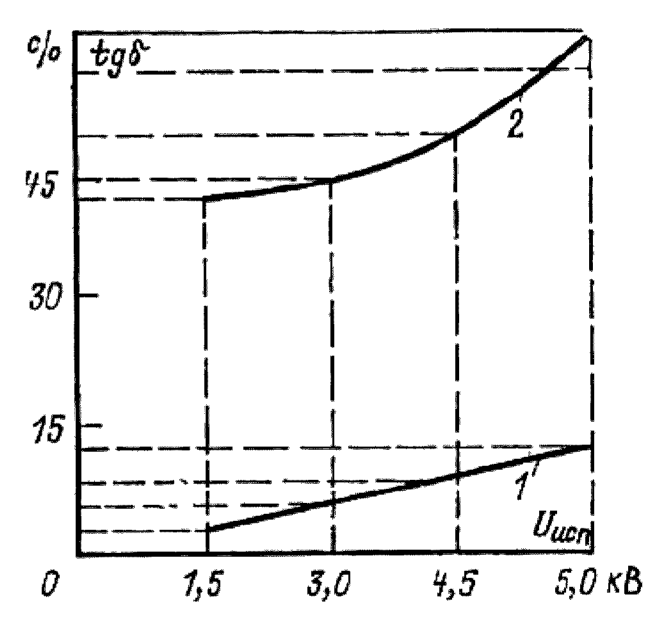


Рис. 125. Зависимость tg δ микафолиевой гильзы от испытательного напряжения $U_{исп}$: 1 — при 20 °C; 2 — при 90 °C

В обмотках с новыми типами гильзовой изоляции пазовая изоляция имеет лучшие свойства, чем непрерывная микалентная компаундированная, однако ослабленное место стыка гильзы и изоляции лобовой части остается. Гильзовую изоляцию следует изготовлять с «обратным конусом» в месте стыка, что увеличивает путь поверхностных разрядов при одном и том же расстоянии от конуса гильзы до стали ротора. В табл. 75 представлена конструкция изоляции обмоток высокого напряжения с гильзовой изоляцией. В машинах с изоляцией класса нагревостойкости F, а также тропического и химически стойкого исполнений должны применяться материалы на основе стеклотканей или со стеклоподложками (микафолий МФП-Т, микалента ЛФЭ-ТТ или ЛФС-ТТ, стеклолакоткани, стеклотекстолит).

В настоящее время все описанные типы изоляции заменяются более тонкой, более нагревостойкой и механически прочной термореактивной изоляцией на основе слюдяных бумаг и термореактивных связующих. Эта изоляция может быть как на основе предварительно пропитанных термореактивным лаком, так и на основе сухих стеклослюдинитовых и стеклослюдопластовых лент. Изоляция на основе слюдинитовых лент с термореактивным связующим ЛТСС-3 и ЛТСС-5 широко применяется в пазовых частях катушек асинхронных двигателей и синхронных генераторов на напряжение 6600 В. На лобовые части катушек и выводные концы накладывается эластичная изоляция. Несмотря на высокие показатели изоляции пазовых частей (рис. 126), такую изоляцию не следует считать перспективной из-за неравнопрочности ее элементов в пазовой и лобовой частях и наличия стыка — разных типов изоляции. Наиболее перспективна для катушечных обмоток на напряжение до 10 кВ изоляция типа «монолит-2», изготовляемая из сухих стеклослюдинитовых или стеклослюдопластовых лент с последующим введением связующего путем вакуумно-нагнетательной пропитки при высоком разрежении (10–40 Па). Корпусную изоляцию выполняют согласно рис. 127, двусторонняя толщина изоляции составляет 3,8–4,2 мм. После укладки катушек статоры помещают в автоклавы для предварительной сушки и пропитки эпоксидным компаундом, а после извлечения из автоклава запекают изоляцию. Статоры больших габаритов сложно пропитывать целиком. Поэтому существует

Таблица 75

Гильзовая изоляция обмотки переменного тока на напряжение 3300 В (класс В, исполнения У, ХЛ)

Позиция по рис. 101	Материал			Количество слоев		Толщина изоляции, мм	
	Наименование	Марка	Толщина, мм	по ширине	по высоте	по ширине	по высоте
1	Микафолий	МФГ-Б	0,2	6,5 оборота		2,5	2,5
2	Бумага намоточная лакированная	—	0,10	2,5 оборота		0,5	0,5
—	Толщина изоляции катушки	—	—	—	—	3,1	3,1
—	Допустимые отклонения	—	—	—	—	+0,1	—0,4 ±0,5
3	Электронит	—	0,3	2	3	0,6	0,9
4	Стеклотекстолит	СТ	0,5	—	2	—	1,0
5	Стеклотекстолит	СТ	1,0	—	1	—	1,0
	Допуск на укладку	—	—	—	—	0,5	0,5
	Всего на паз без клина	—	—	—	—	4,2	9,6
7	Лавсановая лента	Тафтяная	0,16	1 вразбежку		0,32	0,32
8	Микалента	ЛМЧ-ББ	0,17	4 вполнахлеста		2,7	2,7
9	Лавсановая лента	Тафтяная	0,1	1 вполнахлеста		0,64	0,64
—	Разбухание от пропитки	—	—	—	—	0,24	0,34
—	Толщина изоляции	—	—	—	—	3,9	4,0
—	Допустимые отклонения	—	—	—	—	±0,5	±0,6
10	Микалента	ЛМЧ-ББ	0,17	4 вполнахлеста		2,7	2,7
11	Лавсановая лента	Тафтяная	0,16	1 вполнахлеста		0,64	0,64

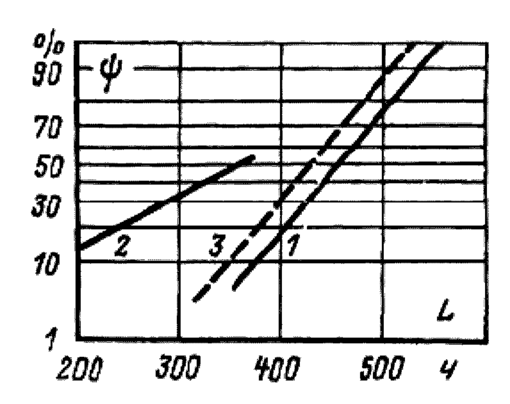


Рис. 126. Распределение сроков службы макетных образцов при испытании напряжением: 1 — микалентная изоляция до вибрации; 2 — то же после вибрации; 3 — изоляция «слюдотерм» после вибрации

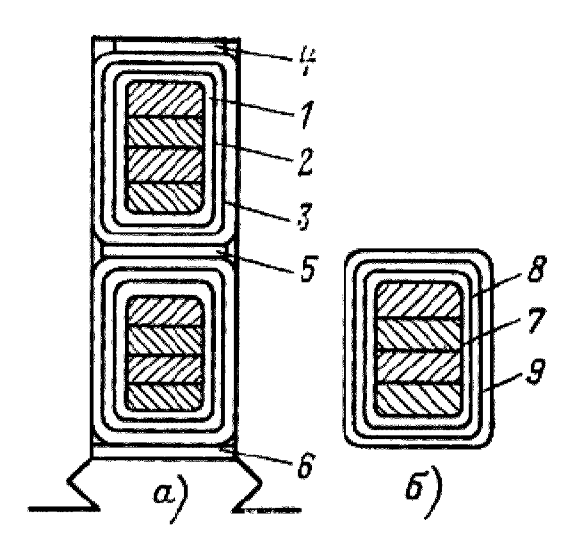


Рис. 127. Изоляция «монолит-3» катушек электродвигателей на напряжение 6600 В: а — пазовая часть; б — лобовая часть (объяснение в тексте)

другой вид изоляции — «монолит-3» (табл. 76), когда изолированные катушки пропитывают эпоксидным компаундом и затем сушат при 45°С в течение 24 ч или на воздухе в течение 10 сут до отсутствия отлипа. Катушки запекают после укладки в статор. Преимуществом этого процесса являются возможность проконтролировать пропитанную изоляцию и после пропитки, и после укладки и лучшая сохранность компаунда; недостатками — потребность в площадях для высушивания отдельных катушек и ухудшение условий труда.

Основными преимуществами изоляции «монолит» по сравнению с микалентной компаундированной являются более высокие

Таблица 76

Изоляция «монолит-3» катушек на напряжение 6600 В

Часть обмотки	Позиция по рис. 127	Материал			Количество слоев по ширине	Толщина, мм	
		Наименование, размер	Марка	Толщина, мм		по ширине	по высоте
Пазовая: на одну катушку	1	Стеклослюдопластовая лента	ЛИР-ТТ	0,14	5 вполнахлеста	2,8	2,8
	2	Стеклослюдопластовая лента	ЛИР-уТТ	0,14	1 внахлест	0,56	0,56
	—	Разбухание от пропитки	—			1,02	1,02
	—	Размер изоляции катушки				4,7	4.8
		Допустимые отклонения размеров катушки				+0,1 –0,4	–,0,5
на паз	4	Стеклотекстолит	СТ	0,5	1	—	0,5
	5	Стеклотекстолит	СТ	0,5	1	—	0,5
	6	Стеклотекстолит	СТ	0,5	1	—	0,5
	—	Допуск на укладку				0,3	0,6
	—	Всего на паз без клина				5,0	11,7
Лобовая: на одну катушку	7	Стеклослюдопластовая лента	ЛИР-ТТ	0,14	5 вполнахлеста	2,8	2,8
	8	Стеклослюдопластовая лента	ЛИР-уТТ	0,14	1 внахлест	0,56	0,56
	9	Лавсановая лента	Тафтяная	0,16	1 вполнахлеста	0,64	0,64
	—	Разбухание от пропитки				1,3	1,6
	—	Размеры изоляции катушки				5,3	5,6
	—	Допускаемые отклонения размеров				±0,5	±1,0

электрическая и механическая прочность и в полтора раза лучшая теплопроводность. Благодаря лучшей теплопроводности и меньшей

толщине снижаются перегревы обмоток и как следствие — стали статора; изоляция «монолит» по нагревостойкости относится к классу В. По данным, в электродвигателе ЛР-800 среднее снижение температуры перегрева обмотки составляло 29, стали статора 19 %. Высокая электрическая и механическая прочность изоляции «монолит-2» позволяет снизить толщину корпусной изоляции на 25–30 % по сравнению с микалентной. Указанные положения хорошо иллюстрируются данными рис. 128–130 и табл. 77–78.

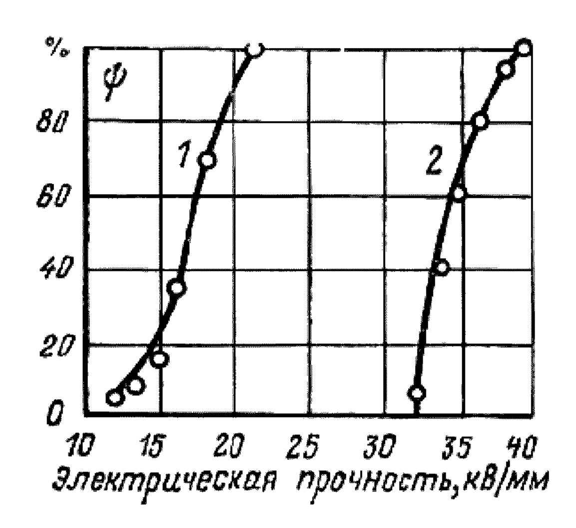


Рис. 128. Кривые распределения значений электрической прочности изоляции толщиной 3 мм на сторону: 1 — микалентная компаундированная; 2 — стеклослюдинитовая («монолит»)

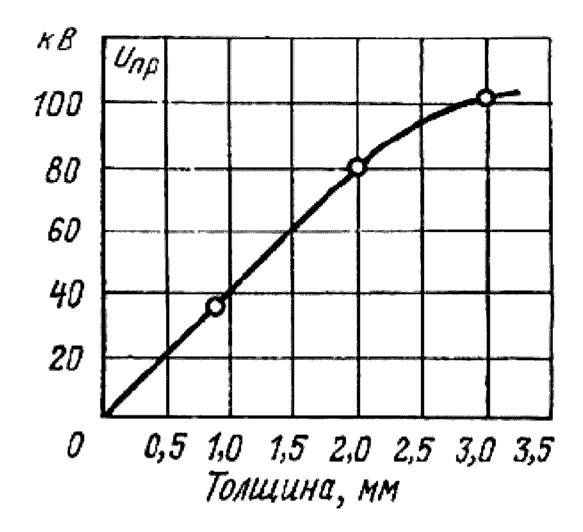


Рис. 129. Зависимость пробивного напряжения $U_{пр}$ стеклослюдинитовой изоляции «монолит» от толщины

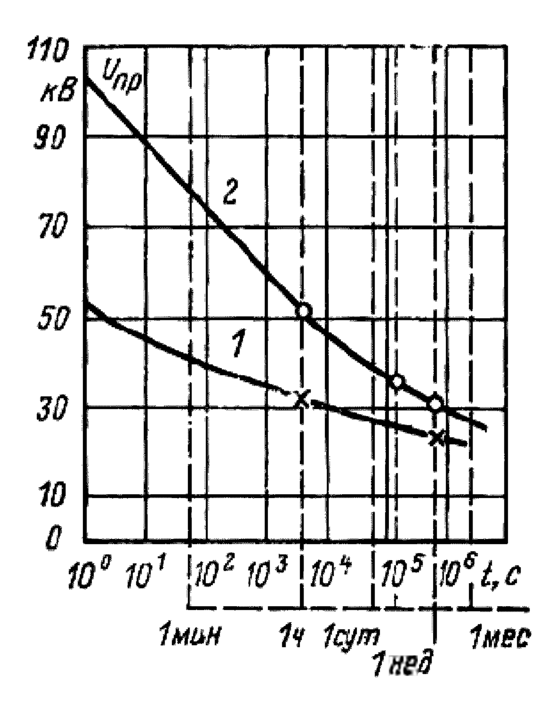


Рис. 130. Срок службы изоляции под воздействием нарастающего напряжения: 1 — микалентная компаундированная изоляция; 2 — стеклослюдинитовая изоляция «монолит»

Таблица 77

Параметры изоляции микалентной компаундированной и «монолит»

Параметр	Микалентная компаундированная изоляция (6 мм на две стороны)	«Монолит-2» (4,2 мм)	«Монолит» (4,2 мм)
Срок службы, ч, при выдержке при 20 °С под напряжением	25 кВ-19 20 кВ-1241 18 кВ-1747 15 кВ-4184	35 кВ-145 30 кВ-925 25 кВ-1454-3453	
Электрическая прочность, МВ/м, при температуре, °С: 20 130	17 14	32 —	34 33
Предел прочности на разрыв, МПа, при температуре, °С: 20 130	68 11	— —	110 40
tgδ при температуре, °С: 20 130	0,03 0,15	0,02 0,07	0,01 0,05
Критическая деформация при 20 °С	5×10^2	$1,2\times10^2$	$1,2\times10^2$

Таблица 78

Электрическая прочность изоляции, МВ/м

Изоляция	Кратковременная			Длительная		
	минимальная	средняя	максимальная	минимальная	средняя	максимальная
«Монолит»	31,4	34,0	36,7	9,8	10,0	11,3
Микалентная	12,0	17,0	21,0	6,0	8,0	8,6

Одна из существенных причин выхода из строя изоляции обмоток высокого напряжения — их механические повреждения из-за плохого крепления и ударов о стенки паза на выходе из него и перетирание изоляции при сдвигах обмоток под воздействием электродинамических усилий. Для крепления лобовых частей катушечных обмоток асинхронных двигателей мощностью выше 100 кВт на боковых поверхностях лобовых частей устанавливают дистанционные прокладки, привязываемые к катушкам до укладки в статор (рис. 131). Прокладки прикрепляют к катушкам сначала поперечной, а затем продольной вязкой. Количество дистанционных прокладок на одно плечо лобовой части определяется по выражению:

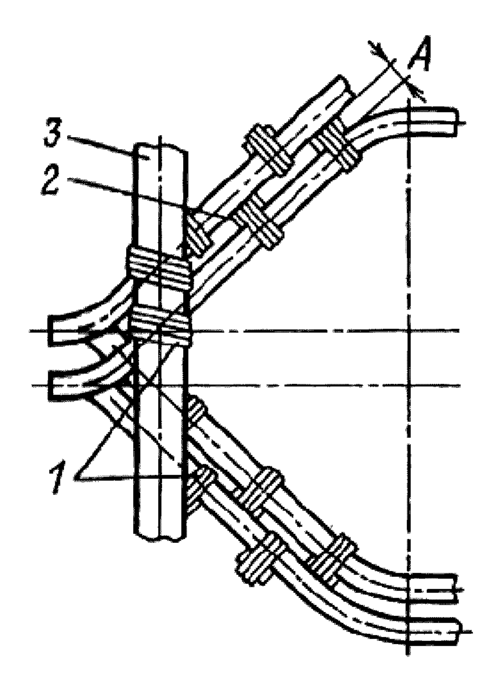


Рис. 131. Крепление лобовых частей обмоток электродвигателей мощностью свыше 100 кВт: 1 — бандаж (льняной шнур или стеклянный чулок); 2 — дистанционная прокладка; 3 — бандажное кольцо

Таблица 79

Исходные данные для расчета дистанционных прокладок

Расположение прокладок	a	R, мм	P	m
В нижней лобовой части	30-40	25/50	0,025	80/108
	41-50	25/50	0,02	80/95
	51-60	25/50	0,017	75/85
В верхней лобовой части	31-40	25/50	0,025	45/65
	41-50	25/50	0,02	40/55
	51-60	25/50	0,017	35/45

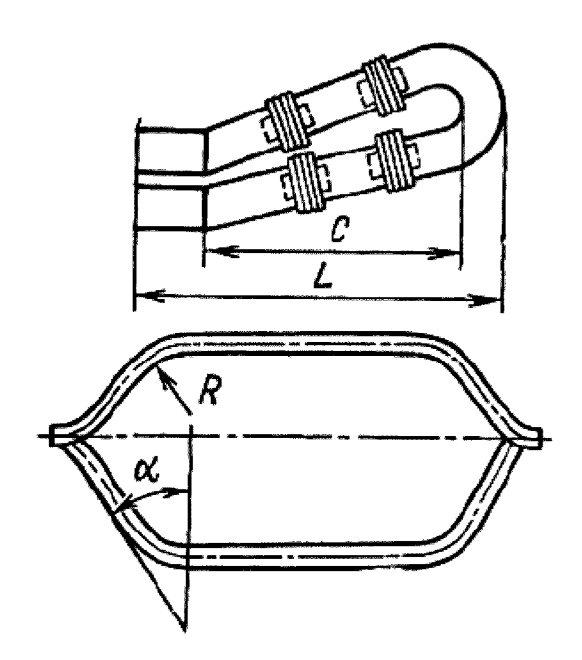


Рис. 132. Катушка статора машины переменного тока мощностью выше 100 кВт

$$K = P(C - m),\qquad (4.24)$$

где P и m — коэффициенты по табл. 79, зависящие от угла отгиба лобовой части a и радиуса закругления R (рис. 132); C — размер, мм, по рис. 132.

Полученное значение K округляется до ближайшего целого числа.

Дистанционные прокладки, устанавливаемые до и после укладки в пазы статора, должны соответствовать рис. 133. Высота прокладок H выбирается в зависимости от высоты катушки в лобовой части, мм:

Высота катушки	15–25	26–35	36–45	46–55
Высота прокладки Н	15–20	25	35	45

Толщина принимается равной зазору между лобовыми частями соседних сторон катушек (размер А на рис. 131) и должна отрабатываться на ряде машин данного типоразмера при установившемся технологическом процессе. Изоляция бандажных колец должна иметь высокую стойкость к истиранию и ударному смятию, поэтому их следует изолировать микалентой или изготовлять из стеклопластиков. Установлено, что большую механическую прочность (стойкость к ударным нагрузкам) имеет микалентная изоляция бандажных колец, допустимо применение стеклолакоткани ЛСТР, а также эскапоновой и латексной стеклолакотканей (табл. 80).

При использовании микаленты или стеклолакоткани ЛСТР изоляция колец должна быть пропитана или прокомпаундирована. При использовании изоляции «монолит-3» рекомендуется применять кольца со стеклолакотканью ЛСТР, которая будет запекаться

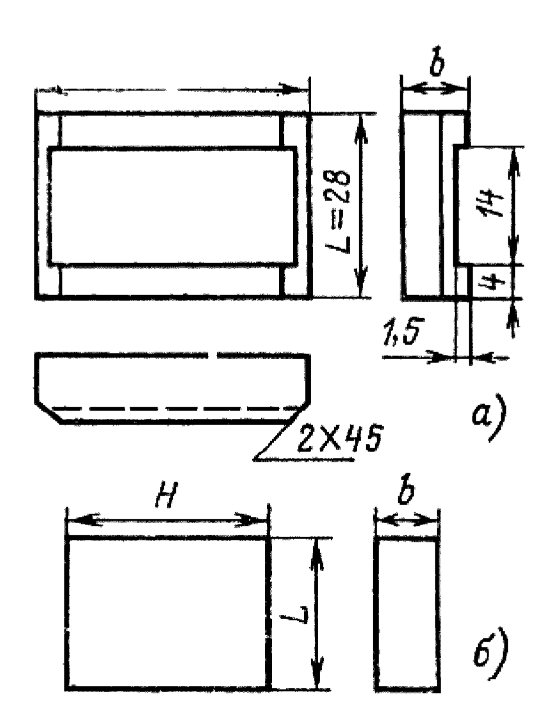


Рис. 133. Дистанционные прокладки между лобовыми частями катушек статоров электродвигателей мощностью выше 100 кВт:
а — устанавливаемые до укладки катушек в пазы; б — после укладки катушек в пазы

Таблица 80

Сопротивление ударному смятию различных видов изоляции бандажных колец

Тип изоляции	Марка	Толщина, мм	Количество слоев	Пробивное напряжение (среднее), кВ: в исходном состоянии, до ударов	после 4000 ударов	потеря электрической прочности, %	после дополнительной сушки или компаундирования, до ударов	после 4000 ударов	Снижение пробивного напряжения, %	Примечание
Эскапоновая стеклолакоткань (липкая) Миткалевая лента	ЛЭСК-19 -	0,19 0,22	7 вполнахлеста 1 вполнахлеста	43,6	29,3	33,0	43,6	26,5	38,7	Сушка при 110–120°С 48 ч
Микалента Миткалевая лента	ЛФЧ-ББ -	0,13 0,22	8 вполнахлеста 1 вполнахлеста	33,4	23,7	29,0	33,6	28,0	16,3	То же
Микалента Миткалевая лента	ЛМЧ-ББ -	0,17 0,22	7 вполнахлеста 1 вполнахлеста	33,1	25,8	22,4	54,5	51,1	5,1	Компаундирование
Лакоткань Миткалевая лента	ЛХЧ -	0,20 0,22	7 вполнахлеста 1 вполнахлеста	40,7	11,3	72,2	50,3	5,4	90,0	Сушка при 110–120°С 48 ч
Стеклолакоткань Миткалевая лента	ЛСМ -	0,20 0,22	7 вполнахлеста 1 вполнахлеста	35,8	11,2	69,6	35,8	20,5	43,0	То же
Лента стеклянная Лента самосклеивающаяся Лента стеклянная	ЛЭС ЛЭТСАР ЛЭС	0,10 0,25 0,10	1 вполнахлеста 4 вполнахлеста 1 вполнахлеста	36,7	17,1	54,2	–	–	–	–
Стеклослюдинитовая Лента на лаке К-43 Миткалевая лента	- -	0,15 0,22	7 вполнахлеста 1 вполнахлеста	42,4	3,5	91,7	28,8	17,3	40,0	Сушка при 110–120°С 48 ч
Слюдинитовая лента Миткалевая лента	- -	0,13 0,22	7 вполнахлеста 1 вполнахлеста	36,0	0	100	36,0	22,1	38,5	Компаундирование
Лакоткань Миткалевая лента	ЛХС -	0,20 0,22	7 вполнахлеста 1 вполнахлеста	38,1	8,1	79,0	43,0	7,0	83,8	Сушка при 110–120°С 48 ч
Стеклолакоткань	ЛСТР	0,19	Звнахлест	–	–	–	12,0	9,5	20,8	Сушка при 125–130 °С 18 ч

в статоре, при изоляции «монолит-2» лучше изолировать бандажные кольца теми же лентами, что и катушки. Внутримашинные соединения компаундированных и гильзовых обмоток высокого напряжения изолируют лентами толщиной 0,17 мм из эскапоновой и латексной стеклолакотканей (класс нагревостойкости А), микалентой ЛМЧ-ББ (класс нагревостойкости В) пятью слоями вполнахлеста для машин напряжением до 3300 В и семью слоями — для машин напряжением до 6600 В. Сверху накладывают вполнахлеста один слой лавсановой тафтяной или стеклянной ленты. Применявшаяся ранее изоляция внутримашинных соединений была менее влагостойка, чем изоляция катушек. В настоящее время имеются более эластичные и влагостойкие материалы для изолирования внутримашинных соединений. К ним относится стеклолакоткань ЛСТР, самосклеивающаяся при нагревании. Ее следует применять для обмотки с изоляцией «монолит-3». При запекании обмотки происходит и запекание изоляции из этой стеклолакоткани. Если после укладки в статор обмотка не подвергается запеканию, то следует применять для изолирования внутримашинных соединений кремнийорганическую самосклеивающуюся резиновую ленту ЛЭТСАР. Так как она нестойка к проколам, то места паек до ее наложения должны быть изолированы лавсановыми или стеклянными лентами. В машинах с изоляцией класса нагревостойкости А для выводов применяют провода ПРГ на напряжение 3300 и 6600 В. В машинах с более нагревостойкой изоляцией, а также в машинах тропического и химически стойкого исполнений для выводов применяют провода РКГМ, дополнительно изолированные лентами из стеклолакоткани ЛСЭ, ЛСЛ или ЛСБ, пятью слоями вполнахлеста для напряжения 3300 и семью — для 6600 В.

4.2.5. Изоляция роторных обмоток асинхронных двигателей

Фазные роторы асинхронных двигателей малой мощности обычно имеют всыпную обмотку, которая практически не отличается от аналогичной обмотки якорей машин постоянного тока сравнимой мощности. Роторные обмотки электродвигателей большой мощности выполняются стержневыми из неизолированной меди с твердой гильзовой изоляцией в пазовой части (рис. 134 и табл. 81.1 и 81.2). Толщина изоляции стержней зависит от максимального напряжения на кольцах.

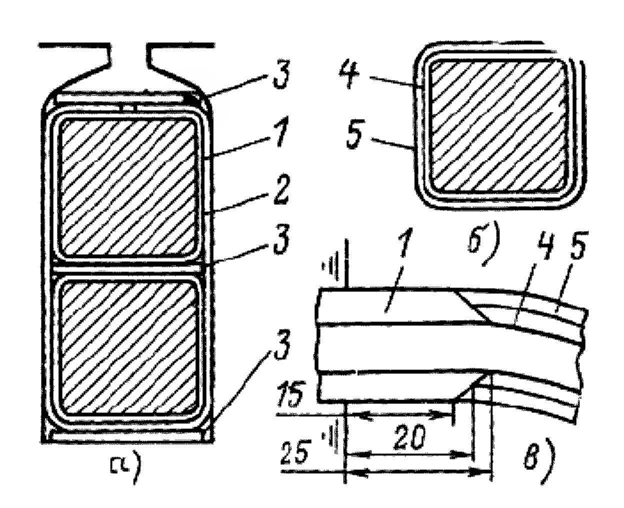


Рис. 134. Изоляция роторных обмоток асинхронных двигателей мощностью 100–1000 кВт: а — пазовая часть; б — лобовая часть; в — изоляция уголков; 1 — слюдопластофолий; 2, 3 — электронит; 4 — слюдопластолента; 5 — лавсановая лента

Таблица 81.1

Изоляция обмоток ротора асинхронных двигателей

Часть обмотки	Позиция по рис. 134	Класс В, исполнение У		Классы F и H, все исполнения, класс В, тропическое и химически стойкое исполнение			
		Материал	Марка	Материал	Марка для класса		
					B	F	H
Пазовая: на один стержень	–	Лакировка стержней	ГФ-957	Лакировка стержней	ГФ-957	ТФП-18	К-42
	1	Слюдопластофолий	ИФГ-Б	Микафолий	МФГ-Т	МФП-Т	МФК-Т
	–	Толщина изоляции	–	–	–	–	–
	–	Допустимые отклонения	–	–	–	–	–
на паз	2	Электронит	–	Стеклолакоткань	ЛСБ	ЛСП	ЛСП
	3	Электронит	–	Стеклотекстолит	СТ	СТЭФ	СТК
	–	Допуск на укладку	–	–	–	–	–
	–	Толщина изоляции на паз	–	–	–	–	–

Таблица 81.1 (окончание)

Изоляция обмоток ротора асинхронных двигателей

Часть обмотки	Позиция по рис. 134	Класс B, исполнение У		Классы F и H, все исполнения, класс B, тропическое и химически стойкое исполнение			
		Материал	Марка	Материал	Марка для класса		
					B	F	H
Лобовая: на один стержень	4	Слюдопластолента	ЛСПЭ-934	Микалента	ЛСПЭ-934	ЛСПЭ-934	ЛФК-ТТ
	5	Лавсановая лента	Тафтяная	Лента лавсановая	Тафтяная	Тафтяная	Тафтяная
	–	Толщина изоляции	–	–	–	–	–
	–	Допустимые отклонения	–	–	–	–	–

Таблица 81.2

Изоляция обмоток ротора асинхронных двигателей

Часть обмотки	Позиция по рис. 134	Толщина материала, мм	Число слоев				Толщина, мм			
			при напряжении до 550 В		при напряжении 550–1250 В		при напряжении до 550 В		при напряжении 550–1250 В	
			по ширине	по высоте	по ширине	по высоте	по ширине	по высоте	по ширине	по высоте
Пазовая: на один стержень	–	–	–	–	–	–	0,1		0,1	0,1
	1	0,2	3,5 оборота		5,5 оборота		1,4		2,2	2,2
	–	–	–	–	–	–	1,5		2,3	2,3
	–	–	–	–	–	–	+0,2 –0,3	±0,4	+0,2 –0,3	±0,4
на паз	2	0,15	2	2	2	2	0,3	0,3	0,3	0,3
	3	0,5	–	3	–	3	–	1,5	–	1,5
	–	–	–	–	–	–	+0,3	+0,6	+0,3	+0,6
	–	–	–	–	–	–	2,1	5,4	2,9	7,0
Лобовая: на один стержень	4	0,13	1 вполнахлеста		2 вполнахлеста		0,52	0,52	1,08	1,08
	5	0,16	1 вполнахлеста		2 вполнахлеста		0,64	0,64	0,64	0,64
	–	–	–	–	–	–	0,9	0,9	1,5	1,5
	–	–	–	–	–	–	±0,4	±0,5	±0,5	±0,6

Раньше единственными материалами для гильзовой изоляции стержней были миканитовые материалы (микафолий и стекломикафолий). В настоящее время вместо микафолия широкое применение получили слюдинитофолий и слюдопластофолий, обеспечивающие вполне надежную пазовую изоляцию роторных стержней. Стеклослюдинитофолий и стеклослюдопластофолий на термореактивных лаках могут заменить стекломикафолий для изоляции класса нагревостойкости F. Эти материалы при обкатке и опрессовывании получают усадку до 30 %, в связи с чем при расчете нужно соответственно увеличить количество слоев и длину заготовок. При применении слюдопластофолия ИФГ-Б толщина изоляции стержней может быть уменьшена на 30 %, т. к. изоляция на его основе более однородна, чем микафолиевая и слюдинитофолиевая. Стержни роторов электродвигателей мощностью до 100 кВт могут иметь двустороннюю толщину гильзовой изоляции из слюдинитофолия или слюдопластофолия 1,0–1,1 мм, т. к. у них обычно меньше напряжение на кольцах, чем у двигателей мощностью выше 100 кВт. Возможно использование для гильзовой изоляции классов нагревостойкости А и Е полиэтилентерефталатной пленки (рис. 135); при этом снижается толщина и повышается влагостойкость изоляции. Так как после укладки стержней в полузакрытый паз ротора их прямые лобовые части выгибают для придания необходимой формы, на этих частях применяют эластичную ленточную изоляцию. Очень важно, чтобы

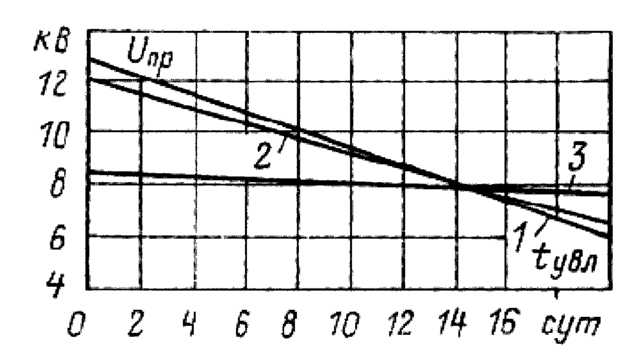


Рис. 135. Зависимость пробивного напряжения $U_{пр}$ пазовой части роторных стержней от времени пребывания $t_{увл}$ в атмосфере 98-процентной относительной влажности воздуха: 1 — твердая гильза из микафолия, двусторонняя толщина изоляции 1,4 мм; 2 — то же из слюдинитофолия, толщина изоляции 1,4 мм; 3 — гильзовая изоляция из пленки хостафан, толщина изоляции 0,6 мм

Таблица 82

Параметры изоляции лобовых частей роторных стержней, выполненной лентами толщиной 0,13 мм вполнахлеста

Материал	Марка	Пробивное напряжение, кВ				Потеря электрической прочности при изгибе стержней, %
		Изогнутая часть		Прямая часть после изгиба		
		среднее	минимальное	среднее	минимальное	
Стеклослюдопластовая лента	ЛИФЧ-ББ	3,3	2,4	3,2	2,0	3,0–16
Микалента	ЛМЧ-ББ	3,6	2,2	3,0	1,6	17,0–299
Стеклолакоткань	ЛСП	4,8	2,7	2,8	1,2	43,3–55
Микалента	ЛФС-ТТ	2,5	1,9	2,1	1,1	16,0–42
Стеклолакоткань	ЛСТР	5,6	4,0	4,3	3,0	20,0–25
Стеклослюдинитовая лента	ЛСПЭ-934	10,8	10,0	10,7	10,0	0–0

при изгибании лобовых частей эта изоляция повреждалась минимально (табл. 82).

Особенно тщательно следует выполнять место стыка гильзовой и ленточной изоляции, и т. к. роторный стержень вставляется в паз с торца, то в месте стыка изоляции пазовой и лобовой частей не должно быть утолщений при достаточно высоком пробивном напряжении. На роторные стержни целесообразно накладывать «твердую» гильзу под «прямой конус», что позволяет получить стык нужной толщины и надежности. Конструкция изоляции деталей крепления и соединения роторных обмоток асинхронных двигателей представлена на рис. 136 и в табл. 83.1, 83.2.

В обмоточном роторе хомутики и концы выводных шин изолируют с боков и торцов, а остальные хомутики — только с боков. Провода и шины, соединяющие роторную обмотку с контактными кольцами, изолируют в зависимости от напряжения на кольцах двумя–четырьмя слоями вполнахлеста стеклолакоткани ЛСП для классов В и F или микалентой ЛФЭ-ТТ или ЛФС-ТТ и ЛФК-ТТ соответственно для классов нагревостойкости F и H, поверх накладывается один слой лавсановой или стеклянной ленты вполнахлеста. В старых сериях электродвигателей до 100 кВт контактные кольца роторов насажива-

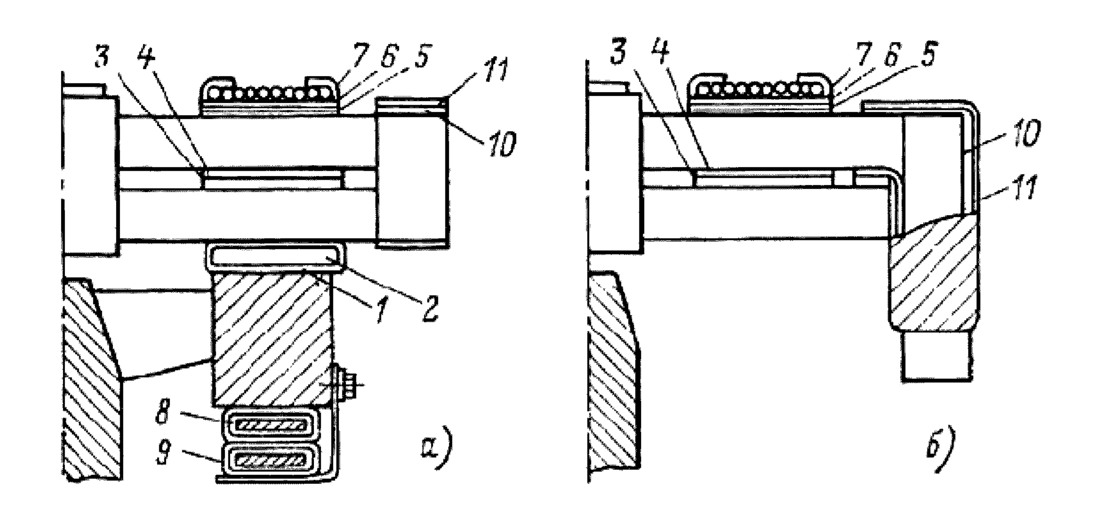


Рис. 136. Изоляция деталей крепления и соединения роторных обмоток асинхронных двигателей мощностью 100–1000 кВт:
а — для роторов с обмоткодержателями; б — для роторов без обмоткодержателей; 1, 3 — лакостеклослюдопласт; 2, 4, 9 — лавсановая лента; 5–7 — стеклобандажная лента; 8, 10 — стеклолакоткань; 11 — стеклянная лента

лись на втулку, изолированную электрокартоном (2 мм на сторону) и гибким миканитом ГФЧ-ББ. Для электродвигателей тропического исполнения классов нагревостойкости В и F втулку изолируют электронитом и формовочным миканитом марки ФФГА. Применение гибких миканитов ГФС и ГФК или гибких стекломиканитов ГФС-ТТ и ГФК-ТТ для изолирования втулок контактных колец недопустимо, т. к. при посадке разогретых контактных колец и запекании покрывных эмалей, нанесенных на поверхность изоляции втулок, из миканитов выдавливается лак и посадка колец ослабляется; такое же явление может наблюдаться при эксплуатации. Гораздо надежнее изоляция втулок контактных колец двигателей мощностью выше 100 кВт из формовочного миканита. Для предохранения миканита от выветривания сверху наносят стеклянную ленту, которую покрывают электроизоляционной эмалью. В машинах исполнения У с изоляцией класса нагревостойкости В для изоляции втулок допустимо применение формовочного слюдинита или формовочного слюдопласта вместо формовочного миканита, но во избежание оплавления слюдинита при насадке разогретых до 450 контактных колец слюдинит сверху покрывают одним слоем формовочного

Таблица 83.1

Изоляция деталей крепления и соединения роторов со стержневой обмоткой

Позиция по рис. 136	Класс В, исполнения У, ХЛ				
	Материал	Марка	Толщина, мм	Количество слоев	
				при напряжении до 550 В	при напряжении 550–1250 В
Изоляция обмоткодержателя					
1	Лакостекло-слюдопласт	ГИТ-Т-ЛСБ	0,45	2	3
2	Лавсановая лента	Тафтяная	0,16	2 вполнахлеста	
Изоляция между рядами					
3	Лакостекло-слюдопласт	ГИТ-Т-ЛСБ	0,45	2	3
4	Лавсановая лента	Тафтяная	0,16	1 вполнахлеста	
Подбандажная изоляция					
5	Стеклобандажная лента	ЛСБ-В	–	–	–
6	–	–	–	–	–
7	–	–	–	–	–
Изоляция выводных и соединительных шин					
8	Стеклолакоткань	ЛСП	0,15	1 вполнахлеста	2 вполнахлеста
9	Лавсановая лента	Тафтяная	0,16	1 вполнахлеста	
Изоляция хомутиков					
10	Стеклолакоткань	ЛСП	0,15	1 вполнахлеста	2 вполнахлеста
11	Лента стеклянная	ЛЭС	0,1	1 вполнахлеста	

миканита толщиной 0,5 мм. Общая толщина миканитовой, слюдопластовой или слюдинитовой изоляции втулки составляет 2–3 мм на одну сторону. Для узлов контактных колец небольших размеров в последнее время все шире используют изоляцию из асбодина, АГ-4, У5-301-41 и других высокопрочных малоусадочных пресс-масс, а также применяют консольную конструкцию, в которой кольца крепят на проходящих через них консольных пальцах, опрессованных высокопрочными и нагревостойкими пластмассами, либо на пальцы надевают изоляционные втулки. Раньше лобовые части

Таблица 83.2

Влияние пропитки различными лаками и покрытия эмалями на нагревостойкость скруток из проводов марок ПЭТ-155 диаметром 1,56 мм, ПЭФ-155 диаметром 1,62 мм и ПЭТ-200 диаметром 1,45 мм

Позиция по рис. 136	Классы F и H, все исполнения, класс B, исполнение химостойкое и Т						
	Материал	Марка для классов			Толщина, мм	Количество слоев	
		B	F	H		при напряжении до 550 В	при напряжении 550–1250 В
Изоляция обмоткодержателя							
1	Лакостекломиканит	ГФТ-Т-ЛСБ	ГФЭ-Т-ЛСП	ГФК-Т-ЛСК	0,5	2	2
2	Лавсановая лента		Тафтяная		0,16	2 вполнахлеста	
Изоляция между рядами							
3	Лакостекломиканит	ГФТ-Т-ЛСБ	ГФЭ-Т-ЛСП	ГФК-Т-ЛСК	0,5	2	3
4	Лавсановая лента		Тафтяная		0,16	1 вполнахлеста	
Подбандажная изоляция							
5	Стеклобандажная лента	ЛСБ-В	ЛСБ-F	ЛСП	0,15	2	3
6	Миканит формовочный	–	–	ФФКА	0,5	1	2
7	Стеклолакоткань	–	–	ЛСП	0,15	2	3
Изоляция выводных и соединительных шин							
8	Микалента	ЛФС-ТТ	ЛФЭ-ТТ	ЛФК-ТТ	0,17	1 вполнахлеста	2 вполнахлеста
9	Лавсановая лента		Тафтяная		0,16	1 вполнахлеста	
Изоляция хомутиков							
10	Стеклолакоткань	ЛСП	ЛСП	ЛСП	0,15	1 вполнахлеста	2 вполнахлеста
11	Лента стеклянная	ЛЭС	ЛЭС	ЛЭС	0,1	1 вполнахлеста	

обмоток роторов крепили при помощи бандажей из стальной луженой проволоки, отдельные витки которой скрепляли вспомогательными жестяными скобами и пропаивали оловянисто-свинцовым припоем. Между проволочным бандажом и обмоткой прокладывали подбандажную изоляцию. Ныне вместо проволочных бандажей применяют стекловолокнистые. При этом подбандажная изоляция не ставится, т. к. стекловолокнистый бандаж имеет высокие электроизоляционные свойства. Для обмоток с изоляцией классов нагревостойкости А, Е и В используют стекловолокнистую бандажную ленту ЛСБ-В; для класса F — ленту ЛСБ-F. Сечение стекловолокнистого бандажа должно быть примерно в 3 раза больше, чем проволочного. При соединении контактных колец с обмоткой ротора через осевое отверстие в валу для выводных концов применяют провода таких же марок, как и для выводов статорных обмоток. Роторы для машин исполнения У со стержневой обмоткой достаточно пропитать лаком 1 раз, роторы тропического исполнения пропитывают 2 раза. Роторы с изоляцией класса нагревостойкости В пропитывают лаком МЛ-92, класса F — лаком ПЭ-933, класса Н — лаком КО-916к. Лобовые части обмоток роторов с изоляцией классов А и В рекомендуется покрывать эмалью ГФ-92ГС; класса F — эмалью ЭП-91, класса Н — эмалью КО-935.

4.2.6. Изоляция обмоток роторов синхронных машин

Обмотки возбуждения явнополюсных синхронных машин выполняют в виде катушек, расположенных на сердечниках полюсов ротора. Катушки роторов машин мощностью до 100 кВт обычно наматывают из круглого или прямоугольного изолированного провода непосредственно на изолированный полюс (рис. 137 и табл. 84.1 и 84.2). Применяют провода как со стекловолокнистой изоляцией, так и эмалированные. Иногда наматывают неизолированную шинную медь с прокладками между витками.

Для создания монолитности следует в процессе намотки катушки промазывать каждый слой густой пастой, изготовленной на основе эмалей ГФ-92ГС (для классов нагревостойкости А, Е и В), ЭП-91 (для класса F)КО-935 (для класса Н) с добавлением небольшого количества (до 12 %) прокаленного асбестового волокна. Толщина слоя пасты должна быть примерно 0,5 мм. При намотке проводни-

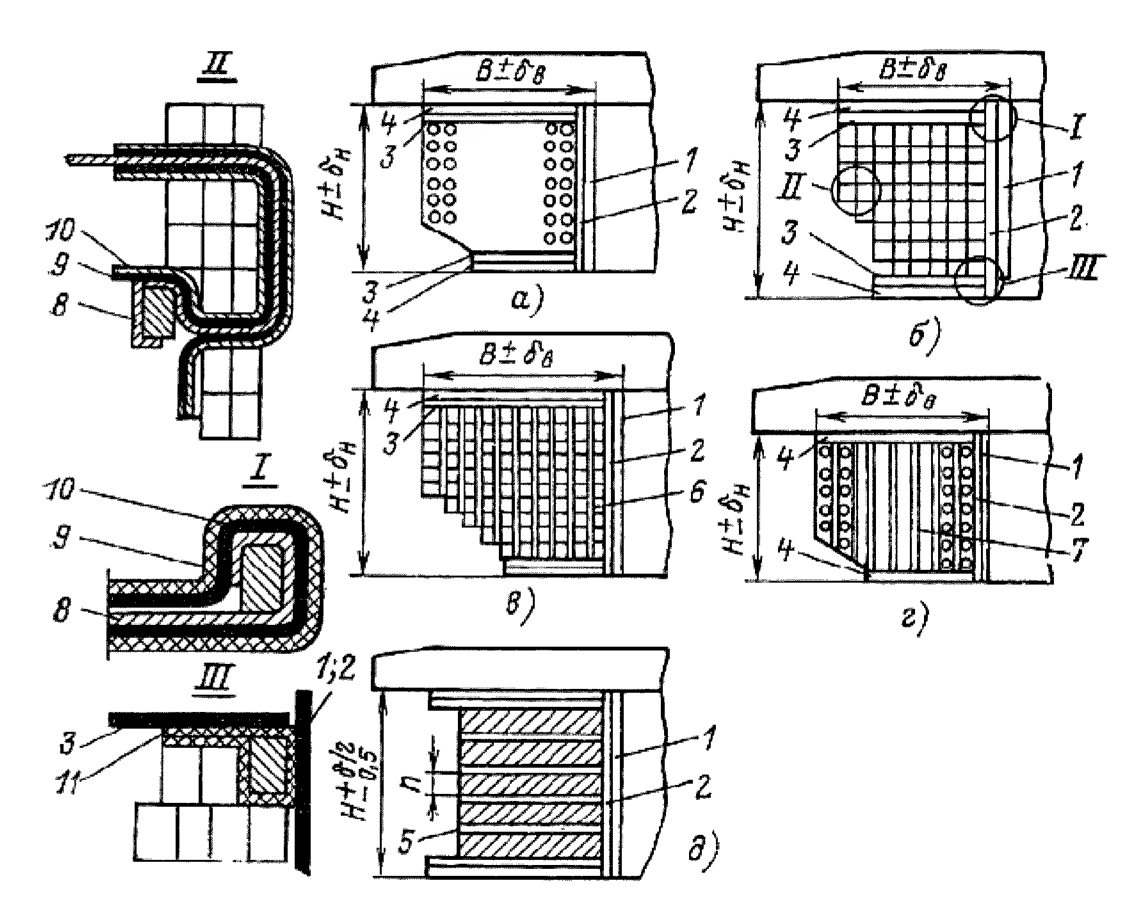


Рис. 137. Изоляция катушек роторов явнополюсных синхронных машин мощностью до 100 кВт: а–д — модификации катушек; 1 — слюдопластофолий; 2 — бумага телефонная лакированная; 3 — миканит прокладочный; 4 — гетинакс; 5 — бумага асбестовая; 6 — слюдинит гибкий; 7 — бумага конденсаторная; 8 — выводные концы; 9, 11 — стеклолакоткань; 10 — лента лавсановая

ков паста должна вдавливаться в промежутки между ними. После двукратного покрытия эмалями с соответствующим температурным индексом (ГФ-92ГС, ЭП-91 или КО-935) и сушки катушек в течение 16–20 ч (при 110–120°С, если применена эмаль ГФ-92ГС, или при 180–200°С, если применены эмали ЭП-91 или КО-935) изоляция становится монолитной и влагостойкой. Изоляция должна быть механически прочной и иметь достаточную толщину (изоляция сердечника — не менее 1,2 мм), т. к. в процессе изготовления и эксплуатации она подвергается значительным механическим воздействиям. Наибольшая надежность обеспечивается при пропитке катушек эпоксидным компаундом. В этом случае применять эмалированные

Таблица 84.1

Изоляция катушек роторов явнополюсных синхронных машин мощностью до 100 кВт

Позиция по рис. 137	Классы А и В, исполнение У			
	Материал	Марка	Толщина, мм	Количество слоев
1	Слюдопластофолий	ИФГ-Б	0,15	10
2	Бумага телефонная лакированная	КТ-05	0,07	3
3	Миканит прокладочный	ПФГ	0,5	1
4	Гетинакс	Б	3,0–5,0	1
5	Бумага асбестовая, дополнительно лакированная	В	0,3	1 между витками
6	Слюдинит гибкий	Г2СП	0,2	1 между витками
7	Бумага конденсаторная	–	0,03	1 между витками
8	Выводные концы	Медная шинка	–	–
9	Стеклолакоткань	ЛСЛ	0,2	1–2
10	Лента лавсановая	Тафтяная	0,16	1 вполнахлеста
11	Стеклолакоткань	ЛСЛ	0,2	1–2 вполнахлеста

Таблица 84.2

Изоляция катушек роторов явнополюсных синхронных машин мощностью до 100 кВт

Позиция по рис. 137	Классы F и H, все исполнения, класс В, исполнение химически стойкое и Т					
	Материал	Марка для классов			Толщина, мм	Количество слоев
		В	F	H		
1	Микафолий или формовочный миканит	МФГ-Т ФФГ	МФП-Т ФФП	МФК-Т ФФК	0,2 0,5	8 3
2	Лента лавсановая	Тафтяная			0,16	1 встык
3	Миканит прокладочный	ПФГ	ПФГ	ПФК	0,5	1
4	Стеклотекстолит	СТ	СТЭФ	СТК	3,5	1
5	Бумага асбестовая, дополнительно лакированная	В	В	В	0,3	1 между витками
6	Гибкий стекломиканит	ГФС-ТТ	ГФЭ-ТТ	ГФК-ТТ	0,20	1 между витками

Таблица 84.2 (окончание)

Позиция по рис. 137	Классы F и H, все исполнения, класс B, исполнение химически стойкое и T					
	Материал	Марка для классов			Толщина, мм	Количество слоев
		B	F	H		
7	Стеклянная ткань	–	–	–	0,025	1 между витками
8	Выводные концы	Медная шинка			–	–
9	Лакостекломиканит	ГФТ-Т-ЛСБ	ГФТ-Т-ЛСП	ГФК-Т-ЛСК	0,5	1
10	Лента лавсановая	Тафтяная			0,16	1 вполнахлеста
11	Микалента	ЛФС-ТТ	ЛФЭ-ТТ	ЛФК-ТТ	0,17	1–2 вполнахлеста

провода нельзя. Катушки роторов явнополюсных синхронных машин мощностью выше 100 кВт изготовляют намоткой на ребро неизолированной прямоугольной медной шинки. Междувитковую изоляцию обычно выполняют в виде прокладки из пропитанной асбестовой бумаги толщиной 0,3 мм (более надежна прокладка из двух слоев асбестовой бумаги толщиной 0,2 мм со сдвинутыми стыками в слоях). Запеченную катушку надевают на изолированный полюс. Катушки изолируют от полюсного башмака и сердечника ротора изоляционными шайбами толщиной 6–10 мм. Для того чтобы катушка была равномерно прижата к ободу ротора и полюсному башмаку, прокладывают выравнивающие шайбы со скосом под выступающие крайние витки или выравнивают поверхность катушек при их изготовлении запеченным слоем пасты, состоящей из асбестового волокна (до 50 %) и термореактивных связующих (например, клея БФ-4). Конструкция изоляции катушек роторов явнополюсных машин мощностью выше 100 кВт представлена на рис. 138 и в табл. 85.

Для катушек электродвигателей исполнения У можно применять вместо формовочного миканита и микафолия формовочный слюдопласт, слюдопластофолий или слюдинитофолий, а также частично заменять миканитовые материалы лакированной асбестовой бумагой (в нижних слоях у сердечника). Для того чтобы миканитовая или асбестовая изоляция сердечника не распушалась по краям, на края ставят манжеты из хлопчатобумажной или стеклянной ткани.

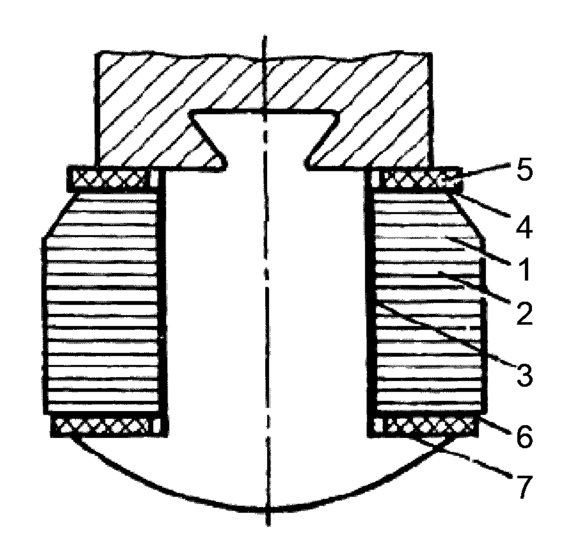


Рис. 138. Изоляция катушек роторов явнополюсных синхронных машин мощностью выше 100 кВт: 1 — полосовая медь; бумага асбестовая электроизоляционная; 3 — миканит формовочный или микафолий; 4, 6 — миканит прокладочный; 5, 7 — стеклотекстолит

Провода и шины, соединяющие обмотку ротора с контактными кольцами, изолируют двумя слоями вполнахлеста стеклолакоткани ЛСЛ и одним слоем вполнахлеста лавсановой ленты. Для машин классов нагревостойкости F и H исполнения T применяют два слоя вполнахлеста микаленты ЛФС-ТТ или ЛФЭ-ТТ и ЛФК-ТТ и один слой стеклянной ленты. Катушки, шайбы и отводы покрывают эмалями ГФ-92ГС (класс B), ЭП-91 (класс F) и КО-935 (класс H). Втулки контактных колец изолируют так же, как и втулки для асинхронных двигателей мощностью выше 100 кВт. Во избежание деформации катушек от действия центробежных сил при больших окружных скоростях ротора между катушками устанавливают распорки, под которые подкладывают изоляцию соответствующего класса нагревостойкости толщиной 2–3 мм.

Размеры катушек рассчитывают по следующим выражениям.

1. Катушка намотана из круглого или прямоугольного изолированного провода (рис. 137 а, б):

а) для прямоугольного провода:

$$H = (h + 0,1)n + 2(2 + 0,5);$$
$$B = (h_{1} + 0,2)n + 3,0 + 2\cdot 3\cdot 0,07 \qquad (4.25)$$

Таблица 85

Изоляция катушек ротора явнополюсных синхронных машин мощностью выше 100 кВт

Позиция по рис. 138	Материал	Марка для классов нагревостойкости			Толщина, мм	Количество слоев	Общая толщина на одну сторону, мм	Примечание
		А, Е, В	F	H				
1	Медь полосовая	МГМ	МГМ	МГМ	–	–	–	Для классов А, Е, В медь и бумага должны быть пропитаны глифталь-бакелитовым лаком, для классов F и H — кремнийорганическим
2	Бумага асбестовая электроизоляционная	В	В	В	0,2	2	0,4	
3	Миканит формовочный или микафолий	ФФГ	ФФП	ФФК	0,5 или 0,20	3	1,5	Для обмоток в тропическом и химически стойком исполнении применять только микафолий МФГ-Т, МФП-Т и МФК-Т или формовочный миканит
		МФГ-Б	МФП-Т	МФК-Т	–	8	1,6	
4, 6	Миканит прокладочный	ПФГ	ПФГ	ПФК	0,5	1	0,5	
5, 7	Стеклотекстолит	СТ	СТЭФ	СТК	5,0	1	5,0	Промежутки между шайбами и сердечником заполняются электроизоляционной замазкой. Для электродвигателей общего назначения класса А вместо текстолита применяется гетинакс марки В
		СТ	СТЭФ	СТК	Не менее 8,0	1	8,0	

б) для круглого провода:

$$H = (D + 0{,}1)n + 2(3 + 0{,}5);$$
$$B = (D + 0{,}2)n_1 + 3 \cdot 0{,}2 + 3 \cdot 0{,}07; \qquad (4.26)$$

в) для прямоугольного провода при наличии прокладок:

$$B = (h_1 + 0{,}2)n_1 + t_1(n_1 - 1) + 3 \cdot 0{,}2 + 3 \cdot 0{,}07; \qquad (4.27)$$

г) для круглого провода (рис. 137, г) при наличии прокладок:

$$B = (D + 0{,}2)n_1 + t_1(n_1 - 1) + 3 \cdot 0{,}2 + 3 \cdot 0{,}07; \qquad (4.28)$$

допуск на высоту:

$$\pm d = \pm d_{hм} \pm d_{из}(n_1 - 1); \qquad (4.29)$$

допуск на ширину:

$$\pm d = \pm d_{bм} \pm d_{из} n_1, \qquad (4.30)$$

где h, h_1, D — высота, ширина и диаметр изолированного провода; t_1 — толщина прокладки; n — количество витков в слое; n_1 — количество слоев; 0,1 и 0,2 — допуски на разбухание от пропитки или промазки, мм, и допуски на размеры медного провода и изоляции; 3×0,2 + 3×0,07 — толщина изоляции позиций 1 и 2, мм; 2(3 + 0,5) — толщина изоляции позиций 3 и 4, мм; 0,2 — толщина изоляции позиции 5 для классов нагревостойкости B, F и H, мм; 0,03 — толщина конденсаторной бумаги (класс А), мм.

2. Катушка намотана из неизолированной меди на ребро (рис. 137, д):

$$H = (h + 0{,}01 + d_{из})n + 2(3 + 0{,}5);$$
$$\pm d = \pm d_{м} n \qquad (4.31)$$

где h — высота меди, мм; $d_{из}$ — толщина изоляции, мм; $d_{м}$ — допуск на размер медной шинки; 0,01 — допуск на непрессованные утолщения на углах.

Допуск на внутренние и наружные размеры катушек принимаются:

— по ширине +3 мм; –1 мм;

— по длине +5÷+10 мм; –2,5 мм;

— по высоте $+d\,h/2$; –0,5 мм.

Для выводных концов применяют провода тех же марок, что и для статорных обмоток асинхронных двигателей. Обмотки на роторе пропитывают только в том случае, когда изолированные, но не пропитанные катушки из проводов с волокнистой, эмалевой или эмаль-волокнистой изоляцией надевают на полюсы ротора. Пропиточные лаки должны обладать высокой цементирующей способностью. Возможно применение для пропиткиобмоток электрических машин составов невлагостойкого исполнения типа КП, для обмоток электрических машин тропического исполнения и класса нагревостойкости F следует использовать лак ПЭ-933. Пропитку следует производить двукратно, а затем катушки нужно покрывать эмалями ГФ-92ГС (для классов А и В) и ЭП-91 (для класса F).

4.2.7. Изоляция обмоток якорей машин постоянного тока

В машинах постоянного тока мощностью примерно до 10 кВт при частоте вращения 1500 мин$^{-1}$ якоря имеют полузакрытые пазы со всыпной обмоткой из круглых проводов тех же марок, что и для статорных обмоток асинхронных двигателей. Изоляция паза якорей этих машин также не отличается от изоляции статорных обмоток с полузакрытым пазом (рис. 139 и табл. 86). Данные об изоляции лобовых частей, бандажей и коллектора представлены в табл. 87.

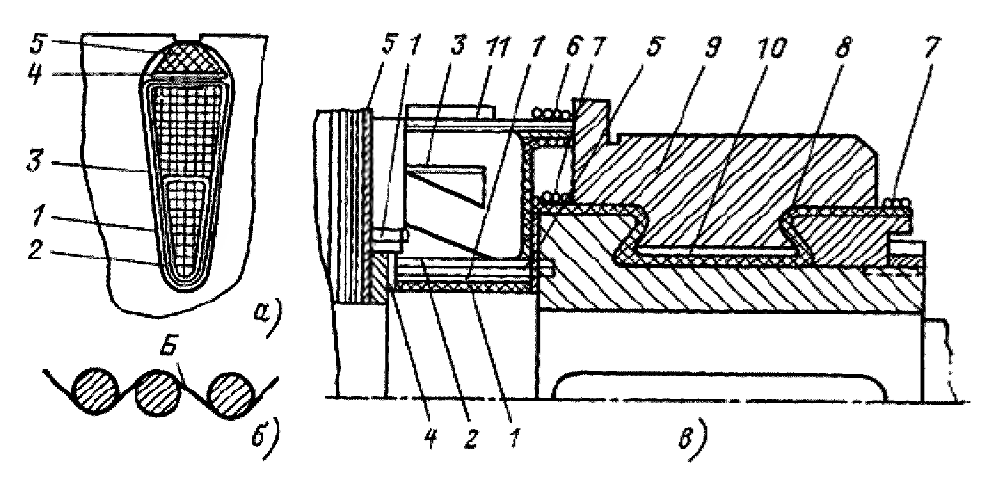


Рис. 139. Изоляция всыпных обмоток якорей машин постоянного тока мощностью 0,6–9 кВт: а — пазовая часть; б — изоляция выводных концов; 1, 3, 4 — пленкосинтокартон; 2 — стеклолакоткань; 5 — клин стеклопластиковый; в — изоляция лобовых частей, вала и подбандажная; 1, 3, 4 — лакостекломиканит ; 2, 6, 7 — лента стеклянная; 5 — стеклотекстолит; 8, 10 — миканит формовочный; 9 — миканит коллекторный; 11 — лента стеклобандажная

Таблица 86

Изоляция пазовой части обмоток якорей мощностью до 9 кВт

Класс изоляции и исполнение электродвигателя	Позиция по рис. 139	Материал			Количество слоев		Двусторонняя толщина изоляции, мм	
		Наименование	Марка	Толщина, мм	по ширине	по высоте	по ширине	по высоте
B, все исполнения	1	Пленкосинтокартон	ПСК-Л	0,27	2	3	0,54	0,81
	3	Пленкосинтокартон	ПСК-Л	0,27	–	1	–	0,27
	4	Пленкосинтокартон	ПСК-Л	0,27	–	1	–	0,27
	5	Клин стеклопластиковый	СППП	Не менее 2	–	1	–	2,0
	–	Всего на паз без клина	–	–	–	–	0,54	1,35
F, все исполнения	1	Пленкосинтокартон	ПСК-Ф	0,28	2	3	0,56	0,84
	3	Пленкосинтокартон	ПСК-Ф	0,28	–	1	–	0,28
	4	Пленкосинтокартон	ПСК-Ф	0,28	–	1	–	0,28
	5	Клин стеклопластиковый	СППП	Не менее 2	–	1	–	2,0
	–	Всего на паз без клина	–	–	–	–	0,56	1,40
H, все исполнения	1	Стекломиканит гибкий	ГФК-ТТ	0,35	2	3	0,7	1,05
	2	Стеклолакоткань	ЛСП	0,15	2	3	0,3	0,45
	3	Лакостекломиканит	ГФК-Т-ЛСК	0,50	–	1	–	0,50
	4	Стеклотекстолит	СТК	0,5	–	1	–	0,5
	5	Клин стеклотекстолитовый	СТК	Не менее 2	–	1	–	2,0
	–	Всего на паз без клина	–	–	–	–	1,0	2,50

Таблица 87

Подбандажная изоляция, изоляция лобовых частей и вала якорей мощностью до 9 кВт

Позиция по рис. 139	Материал				Толщина, мм	Количество слоев
	Наименование	Марка для классов				
		B	F	H		
1	Лакостекломиканит	ГФГ-Т-ЛСБ	ГФЭ-Т-ЛСП	ГФК-Т-ЛСК	0,5	Не менее 2
2	Лента стеклянная	ЛЭС	ЛЭС	ЛЭС	0,1	1 вполнахлеста
3	Лакостекломиканит	ГФГ-Т-ЛСБ	ГФЭ-Т-ЛСП	ГФК-Т-ЛСК	0,5	1
4	Лакостекломиканит	ГФГ-Т-ЛСБ	ГФЭ-Т-ЛСП	ГФК-Т-ЛСК	0,5	1
5	Стеклотекстолит	СТ	СТЭФ	СТК	2,0	1
6	Лента стеклянная	ЛЭС	ЛЭС	ЛЭС	2,0	–
7	Лента стеклянная	ЛЭС	ЛЭС	ЛЭС	0,2	Переплести
8	Миканит формовочный	ФФГА	ФФГА	ФФКА	–	–
9	Миканит коллекторный	КФ	КФ	КФА	0,6–0,8	–
10	Миканит формовочный	ФФГ	ФФГ	ФФК	0,5	–
11	Лента стеклобандажная	ЛСБ-В	ЛСБ-F	ЛСБ-Н	–	–

В машинах с изоляцией классов нагревостойкости B и F нетропического исполнения следует применять лакотканеслюдопласт ГИТ-Т-ЛСБ или ГИТ-ЛСЛ-ЛСБ. Лента стеклянная может быть заменена лентой лавсановой, стеклотекстолит — электронитом. Подбандажную изоляцию ставят только в случае применения проволочного бандажа. Так как лобовые части обмотки соприкасаются с торцами якоря, то торцеве части якоря изолируют электронитовыми или стеклотекстолитовыми шайбами. Для изготовления коллекторов вместо миканитовых манжет в последнее время широко применяют пластмассовую изоляцию из пресс-масс У4-080-02, АГ-4, У5-301-41, смеси асбодина и пресс-массы К-78-51. Эта изоляция лишена недостатков миканитовой изоляции в отношении радиального смещения коллекторных пластин в процессе эксплуатации (рис. 140). Изоляция вала якоря может быть также выполнена в виде пластмассовой втулки. Если якоря машин мощностью приблизительно до 10 кВт

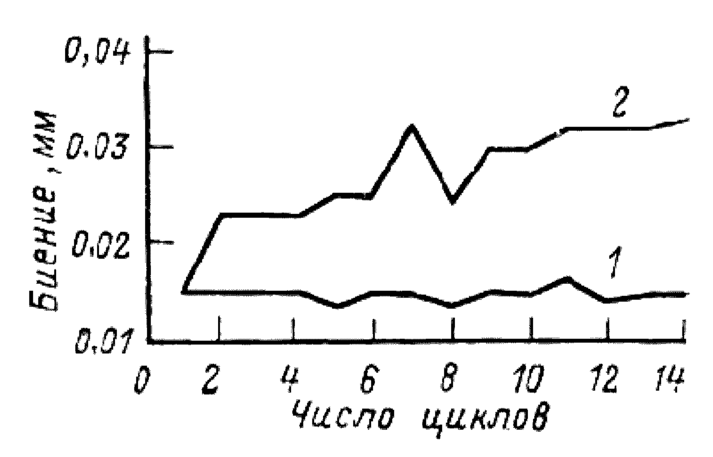


Рис. 140. Изменение биения рабочей поверхности коллекторов диаметром 320 мм: 1 — коллектор на пластмассе; 2 — коллектор с миканитовой изоляцией

выполнены с открытым пазом и секционной обмоткой, то изоляция корпусная и лобовых частей обмотки не отличается от изоляции якорей машин мощностью выше 10 кВт. Обмотки якорей машин мощностью от 10 приблизительно до 200 кВт выполняют из прямоугольных проводов ПБД, ПСД, ПСДК или из прямоугольной шинки, изолированной стеклолакотканью или микалентой. В якорях машин большой мощности обмотки выполняют стержневыми, меньшей мощности — катушечными. Пазовую часть катушечных обмоток на напряжение до 500 В длиной до 300 мм при окружной скорости якоря до 60 м/с изолируют «мягкой» гильзой (рис. 141 и табл. 88.1, 88.2). Если обмотка имеет длину больше 300 мм или работает при напряжении более 500 В, то изолирование пазовой части производят «твердой» гильзой или в виде непрерывной изоляции (табл. 89).

Лобовые части обмоток с «твердой» гильзой изолируют теми же материалами, что и лобовые части обмоток с «мягкой» гильзой; при напряжении выше 500 до 1000 В количество слоев изоляционного материала в лобовой части увеличивают до трех. В обмотке с непрерывной изоляцией пазовая и лобовая части изолированы одинаково. Обмотки с кремнийорганической изоляцией на напряжение до 500 В изолируют двумя слоями микаленты ЛФК-ТТ для якорей со скоростью ниже 60 м/с и тремя слоями при скорости более 60 м/с. При больших окружных скоростях рекомендуется применять изоляцию «монолит-2», при которой катушки изолируют тремя слоями

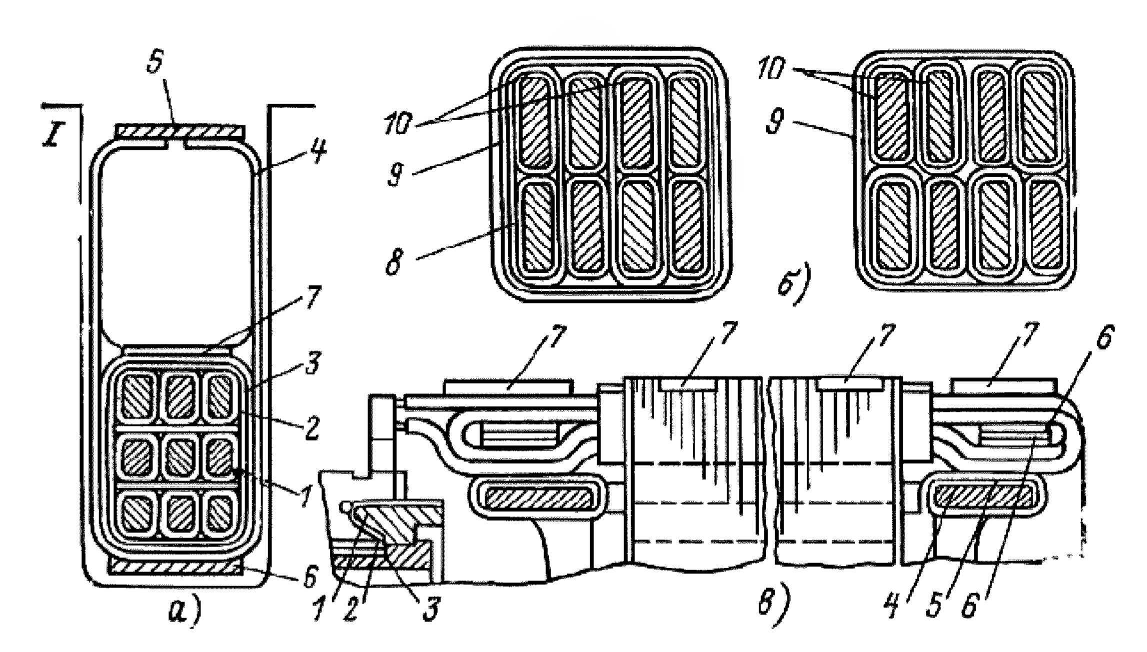


Рис. 141. Изоляция шаблонных обмоток якорей машин постоянного тока мощностью 10–200 кВт: а — пазовая часть; 1 — коллекторный миканит ; 2 — гибкий миканит ; 3, 9, 10 — лента лавсановая; 4–6 — электрокартон; 7 — стеклотекстолит; б — лобовая часть; в — изоляция бандажей, обмоткодержателя, коллектора; 1 — коллекторный миканит; 2 — гибкий стекломиканит; 3, 9, 10 — лента лавсановая; 4 — стеклолакоткань; 5–7 — стеклотекстолит; 8 — микалента

Таблица 88.1

Изоляция обмоток якоря мощностью 10–200 кВт на напряжение до 500 В (длина пазовой части до 300 мм)

Позиция по рис. 141	Класс В, исполнение У						
	Материал			Количество слоев		Толщина, мм	
	Наименование	Марка	Толщина, мм	по ширине	по высоте	по ширине	по высоте
1	2	3	4	5		6	7
2	Гибкий миканит	ГФЧ-ББ	0,2	2,5 оборота		1,0	1,0
3	Лента лавсановая	Тафтяная	0,16	1 встык	0,32	0,32	
–	Разбухание от пропитки	–	–	–	–	0,08	0,18
–	Двустороння толщина изоляции	–	–	–	–	1,4	1,5
4	Электрокартон	ЭВ	0,2	2	3	0,4	0,6

Таблица 88.1 (окончание)

1	2	3	4	5		6	7
5	Электрокартон	ЭВ	0,5	–	1	–	0,5
6	Электрокартон	ЭВ	0,3	–	1	–	0,3
7	Стеклотекстолит	СТ	0,5	–	1	–	0,5
–	Допуск на укладку	–	–	–	–	0,3	0,5
–	Всего на паз без клина					2,1	5,4
8	–	–	–	–	–	–	–
9	Лента лавсановая	Тафтяная	0,16	1 вполнахлеста		0,64	0,64
–	Разбухание от пропитки	–	–	–	–	0,16	0,16
–	Общая толщина на одну катушку	–	–	–	–	0,8	0,8
10	Лента лавсановая	Тафтяная	0,16	1 вполнахлеста		0,64	0,64

Таблица 88.2

Изоляция обмоток якоря мощностью 10–200 кВт на напряжение до 500 В (длина пазовой части до 300 мм)

Позиция по рис. 141	Классы F и H, всех исполнений							
	Материал			Толщина, мм	Число слоев		Толщина, мм	
	Наименование	Марка для классов F	Марка для классов H		по ширине	по высоте	по ширине	по высоте
1	2	3	4	5		6	7	8
2	Гибкий миканит	ГФС–ТТ	ГФК–ТТ	0,25	2,5 оборота		1,25	1,25
3	Лента лавсановая	Тафтяная		0,16	1 встык		0,32	0,32
–	Разбухание от пропитки	–	–	–	–	–	0,13	0,23
–	Двусторонняя толщина изоляции						1,7	1,8
4	Стеклолакоткань	ЛСП	ЛСП	0,15	2	3	0,3	0,45
5	Стеклотекстолит	СТЭФ	СТК	0,5	–	1	–	0,5
6	Стеклотекстолит	СТЭФ	СТК	0,5	–	1	–	0,5
7	Стеклотекстолит	СТЭФ	СТК	0,5	–	1	–	0,5
–	Допуск на укладку	–	–	–	–	–	0,3	0,5
–	Всего на паз без клина	–	–	–	–	–	2,2	5,85

Таблица 88.2 (окончание)

1	2	3	4	5		6	7	8
8	Микалента	ЛФЭ–ТТ	ЛФК–ТТ	0,17	1 вполнахлеста		0,68	0,68
9	Лента лавсановая	Тафтяная		0,16	1 вполнахлеста		0,64	0,64
–	Разбухание от пропитки	–	–	–	–	–	0,28	0,28
–	Общая толщина изоляции на одну катушку	–	–	–	–	–	1,6	1,6
10	Лента лавсановая	Тафтяная		0,16	1 вполнахлеста		0,64	0,64

непропитанной стеклослюдинитовой ленты марки ЛС40-ТТ или стеклослюдопластовой ленты марки ЛИР-ТТ и после укладки в якорь пропитывают эпоксидным компаундом. Данные об изоляции бандажей, обмоткодержателей и коллекторов якорей машин постоянного тока мощностью 10–200 кВт приведены в табл. 90.

Закрепление обмоток в пазах для предотвращения воздействия центробежных сил производят при помощи клиньев. Во избежание ослабления и выпадения клиньев их следует иготовлять из малоусадочных материалов — стеклопластиков, текстолита, стеклотекстолита или высокопрочных электроизоляционных пластмасс. Иногда крепление осуществляют в нескольких местах бандажами из стеклобандажной ленты. Чтобы бандаж не выступал за пределы якоря, листы стали под бандажом штампуют с меньшим наружным диаметром. Лобовые части крепят стекловолокнистыми бандажами, прижимающими их к обмоткодержателю. При больших окружных скоростях в якорях со стержневой обмоткой иногда предусматривают дополнительные бандажи на хомутики. В связи с высокими электроизоляционными параметрами стекловолокнистых бандажей подбандажную изоляцию не применяют, кроме якорей с изоляцией класса нагревостойкости Н с проволочным бандажом.

Обычно площадь сечения стекловолокнистого бандажа принимается в 3 раза больше площади сечения проволочного. Так как прочность бандажных лент для бандажирования около 800, а остальной проволоки 1400–1500 МПа, стекловолокнистые и про-

Таблица 89

Гильзовая (вариант I) и непрерывная (вариант II) якорных катушек (классы F и H, все исполнения, класс B, исполнение Т и химически стойкое)

Часть обмотки	Позиция по рис. 141	Материал				Длянапряжения до 550 В					Для напряжения 600–1000В			
		Наименование	B	F	H	Толщина, мм	Количество слоев		Толщина изоляции, мм		Количество слоев		Толщина изоляции, мм	
							по ширине	по высоте	по ширине	по высоте	по ширине	по высоте	по ширине	по высоте
Катушка: вариант I	2	Микафолий	МФГ-Т	МФП-Т	МФК-Т	0,2	5	5	1,0	1,0	7	7	1,4	1,4
	–	Двустороння толщина изоляции							1,0	1,0			1,4	1,4
Вариант II	2	Микалента	ЛФС-ТТ	ЛФЭ-ТТ	ЛФК-ТТ	0,17	2 вполнахлеста		1,36	1,36	3 вполнахлеста		2,04	2,04
	3	Лента лавсановая	Тафтяная			0,16	1 встык		0,32	0,32	1 встык		0,32	0,32
	–	Разбуханиеот пропитки	–	–	–	–	–	–	0,12	0,12	–	–	0,24	0,24
	–	Толщина изоляции одной катушки							1,8	1,8			2,6	2,6
Паз	4	Стеклолакоткань	ЛСБ	ЛСП	ЛСП	0,15	–	3	0,3	0,45	2	3	0,3	0,45
	5	Стеклотекстолит	СТ	СТЭФ	СТК	0,5	–	1	–	0,5	–	1	–	0,5
	6	Стеклотекстолит	СТ	СТЭФ	СТК	0,5	–	1	–	0,5	–	1	–	0,5
	7	Стеклотекстолит	СТ	СТЭФ	СТК	0,5	–	1	–	0,5	–	1	–	0,5
	–	Допуск на укладку	–	–	–	–	–	–	0,3	0,5	–	–	0,3	0,5
		Всего на паз:												
		Вариант I	–	–	–	–	–	–	1,6	4,5	–	–	2,0	5,3
		Вариант II	–	–	–	–	–	–	2,4	6,1	–	–	3,2	7,7

Таблица 90

Изоляция бандажей, обмоткодержателей и коллекторов якорей машин постоянного тока мощностью 10–200 кВт (классы F и H, все исполнения; класс B, исполнения T и химически стойкое)

Позиция по рис. 141	Материал					
	Наименование	Марки для класса			Толщина, мм	Количество слоев
		B	F	H		
1	Миканит коллекторный	КФ	КФП	КФА	0–0,91	1
2	Миканит формовочный	ФФГА	ФФПА	ФФКА	0,2	–
3	Микафолий или миканит формовочный	МФГ-Т ФФГ	МФП-Т ФФП	МФК-Т ФФК	0,3 0,5	– –
4	Лакостекло-миканит	ГФГ-Т-ЛСБ	ГФЭ-Т-ЛСП	ГФК-Т-ЛСК	0,5	1
5	Лента лавсановая	Тафтяная			0,16	2 вполнахлеста
6	Лакостекло-миканит	ГФТ-Т-ЛСБ	ГФТ-Т-ЛСП	ГФК-Т-ЛСК	0,5	По месту
7	Лента стекло-бандажная	ЛСБ-B	ЛСБ-F	ЛСБ-H	0,2	1 вполнахлеста

волочные бандажи наматывают с разным натяжением. После отверждения смолы напряжение в стекловолокнистом бандаже приблизительно на 50 % снижается и становится вдвое меньше, чем в стальном. Если между обмотками якоря имеются большие зазоры, то их перекрывают полосками из текстолита или стеклотекстолита, чтобы предотвратить вмятие нижних слоев бандажа в зазоры. На стекловолокнистых бандажах по возможности следует избегать установки балансировочных грузов. Стальной бандаж из ферромагнитной проволоки нельзя «автоматически» заменить торца петушков до конца витков обмотки якоря меньше 0,4, рекомендуется применять проволочный бандаж и ставить под него подбандажную изоляцию (на 10–15 мм шире бандажа). При соотношении 0,6 и более применяют стеклобандажи. Якоря со всыпной обмоткой в машинах исполнений T и химически стойкого должны пропитываться на 1 раз больше, чем в машинах исполнения У.

Якоря со всыпной обмоткой в машинах исполнений Т и химически стойкого должны пропитываться на 1 раз больше, чем в машинах исполнения У. Якоря с изоляцией классов нагревостойкости А и В следует пропитывать лаком МЛ-92, класса F — лаком ПЭ-933, класса Н — лаком КО-916к и покрывать эмалью КО-935. Катушечные обмотки пропитывают теми же лаками: витковую изоляцию — 1 раз, катушку с корпусной изоляцией — 1 раз, и затем якорь с обмоткой для электродвигателей исполнения У — 1 раз, для двигателей исполнений Т и химически стойкого — 2 раза. При больших окружных скоростях якорей с изоляцией классов нагревостойкости А и В рекомендуется применять лак ФЛ-98.

4.2.8. Изоляция обмоток главных и дополнительных полюсов машин постоянного тока

В машинах постоянного тока имеются параллельные (шунтовые) или последовательные (сериесные) обмотки или оба вида сразу. Кроме того, все машины постоянного тока имеют обмотки добавочных полюсов, а машины, работающие в тяжелых условиях, — компенсационные обмотки, устанавливаемые на полюсах. Катушки параллельных обмоток обычно имеют большое число витков из круглых или прямоугольных проводов небольшого сечения (марок ПБД, ПЭЛБО, ПЭЛШО, ПЭВ-2 — для класса нагревостойкости А, ПЭТВ, ПСД, ПСДТ — для класса В, ПСД, ПЭТ-155, ПСДТ — для классов В и F, ПСДК, ПСДКТ — для класса Н).

Для электродвигателей тропического исполнения применяют провода с эмалевой или стекловолокнистой изоляцией, для электродвигателей химически стойкого исполнений — только со стекловолокнистой изоляцией. При намотке катушек из круглых проводов рекомендуется во избежание западания витков в рядах прокладывать между ними стеклоткань толщиной 0,025 мм или при классе нагревостойкости изоляции А конденсаторную бумагу. В машинах небольшой мощности катушки с нанесенной в местах их соприкосновения с сердечником и станиной изоляцией насаживают на изолированный полюс. В более крупных машинах провод наматывают на каркас, стенки и торцы которого изолированы, после чего каркас насаживают на полюс. Катушки последовательных обмоток обычно наматывают из прямоугольных изолированных или

неизолированных проводов. Между неизолированными проводниками ставят изоляционные прокладки. В катушках последовательных обмоток изоляцию наносят на катушки и катушки насаживают на неизолированный полюс. Иногда провод наматывают на изолированный каркас. Для лучшей теплоотдачи в машинах со смешанным возбуждением параллельные и последовательные обмотки расположены одна над другой. Провод в катушках добавочных полюсов наматывают из неизолированной меди на ребро или плашмя. Между витками катушки обычно прокладывают асбестовую бумагу, пропитанную лаком. При намотке катушки образуют винтовую линию, поэтому в процессе их изготовления необходимо выравнивать торцевые стороны специальными пастами или делать соответствующие углубления в изоляционных рамках.

Конструкция катушек и материалы, используемые для катушек главных и дополнительных полюсов машин постоянного тока, приведены на рис. 142 и в табл. 91.

В месте стыка шайб с изоляцией стенок каркаса следует прокладывать согнутые под прямым углом полоски стеклолакоткани либо в углах крученый шнур. Для увеличения поверхностиохлаждения катушки иногда выполняются секционными со стальными распорками между секциями. Для улучшения теплопроводности катушек путем придания им монолитности рекомендуется в процессе их намотки промазывать каждый слой густой пастой. Катушки с изоляцией класса нагревостойкости В, особенно исполнений ХЛ и Т, для улучшения теплопроводности изоляции и повышения ее влагостойкости рекомендуется компаундировать. Однако более совершенной является изоляция «монолит-2» на основе непропитанных стеклослюдинитовых или стеклослюдопластовых лент, после нанесения которых на катушку пропитывают эпоксидным компаундом. При наложении корпусной изоляции непосредственно на катушку число слоев лент зависит от напряжения, приходящегося накатушку: при напряжении до 300 В — один слой вполнахлеста, от 300 до 600 В — два слоя, свыше 600 до 3000 В — пять слоев. Шунтовые катушки следует пропитывать под вакуумом и давлением. При применении проводов ПБД и ПЭЛБО катушки можно пропитывать лаком БТ-987 или МЛ-92, при применении проводов ПЭВ-2, ПЭМ-2, ПСД, ПСДТ, ПЭТВ — лаком

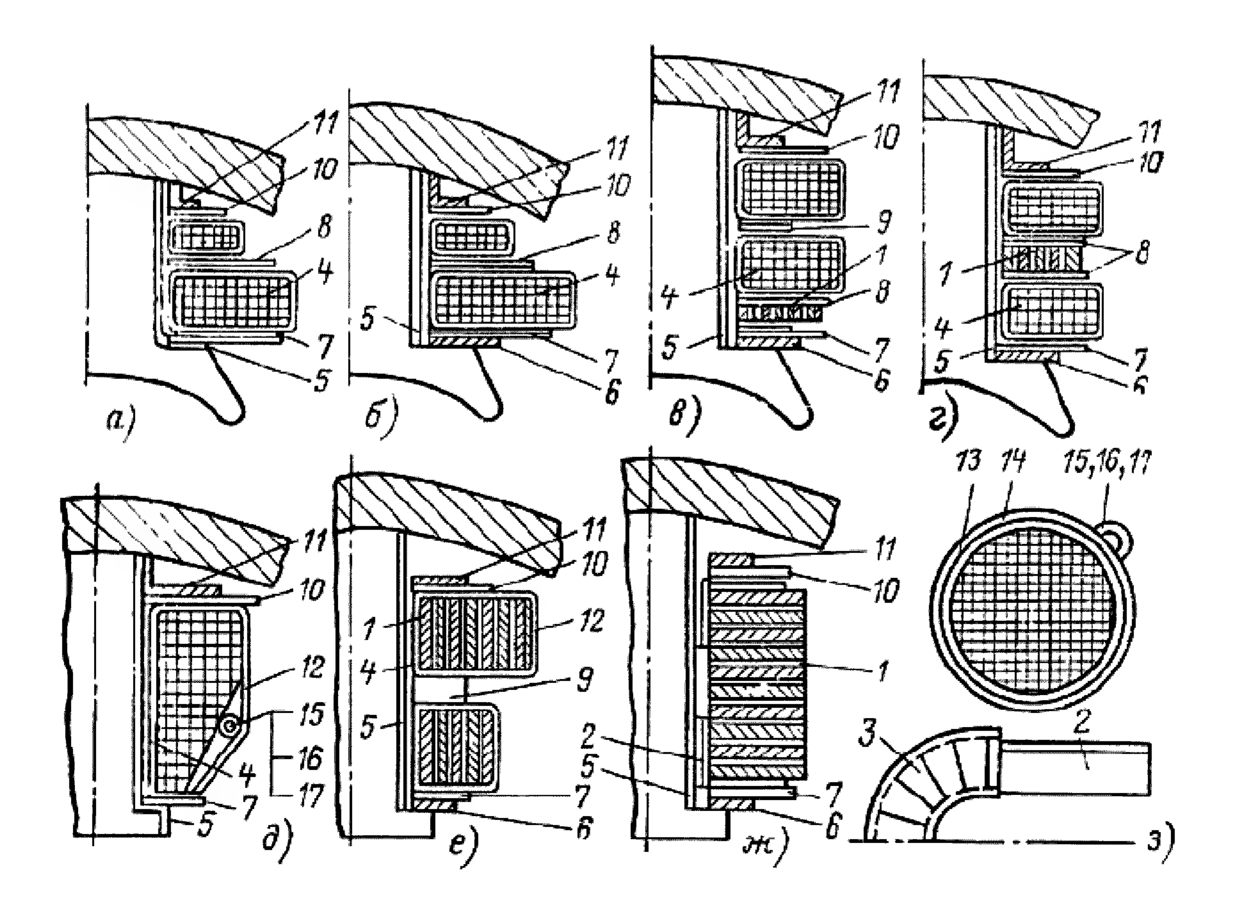


Рис. 142. Изоляция сердечников, полюсов и полюсных катушек:
1, 2 — гибкий слюдинит; 3, 4, 12, 14, 17 — лавсановая лента; 5 — слюдопластофолий; 6 — упорная рамка; 7–10 — стеклотекстолит; 11 — пружинная шайба; 13 — стеклослюдинитовая лента; 15 — провод выводной; 16 — стеклолакоткань

МЛ-92, при ПЭТ-155 — КО-916к. Если провод ПСД или ПСДКТ применяют в катушках с изоляцией класса нагревостойкости F, то их следует пропитывать лаком ПЭ-933: если в катушках класса нагревостойкости Н — лаком КО-916к. После пропитки катушки рекомендуется покрыть эмалями ГФ-92ГС (класса В), ЭП-91 (класс F), КО-935 (класс Н).

4.2.9. заделка (оклетневка) выводных концов

В выводных концах необходимо особенно тщательно изолировать место припайки наконечника (или контактного болта) к выводному проводу, т. к. в условиях повышенной влажности возможны

Таблица 91

Изоляция обмоток главных и дополнительных полюсов машин постоянного тока

Позиция по рис. 142	Класс В, исполнения У, Т и ХЛ				Классы F и H, все исполнения; класс В, исполнения Т и химически стойкое					
	Материал			Количество слоев	Материал					Количество слоев
	Наименование	Марка	Толщина, мм		Наименование	Марка для класса			Толщина, мм	
						B	F	H		
1	Гибкий слюдинит	Г2СП	0,2	1 между рядами	Гибкий стекломиканит	ГФС-ТТ	ГФЭ-ТТ	ГФК-ТТ	0,25	1 между рядами
2	Гибкий слюдинит	Г2СП	0,2	2	Гибкий стекломиканит	ГФС-ТТ	ГФЭ-ТТ	ГФК-ТТ	0,35	–
3	Лента лавсановая	–	0,16	2 вполнахлеста	Лента стеклянная	ЛЭС	ЛЭС	ЛЭС	0,1	2 вполнахлеста
4	Лента лавсановая	–	0,16	2 вполнахлеста	Лента стеклянная	ЛЭС	ЛЭС	ЛЭС	0,1	2 вполнахлеста
5	Слюдопластофолий	ИФГ-Б	0,2	5,5	Микафолий или миканит формовочный	МФГ-Т ФФГ	МФП-Т ФФГ	МФК-Т ФФК	0,2 0,5	5,5 2,25
6	Рамка упорная	Сталь	1,0	1	Рамка упорная	Сталь	Сталь	Сталь	1,0	–
7	Стеклотекстолит	СТ	Не менее 1,5	1	Стеклотекстолит	СТ	СТЭФ	СТК	Не менее 1,5	1
8	Стеклотекстолит	СТ	Не менее 1,5	1	Стеклотекстолит	СТ	СТЭФ	СТК	Не менее 1,5	1
9	Стеклотекстолит	СТ	Не менее 6,0	1	Стеклотекстолит	СТ	СТЭФ	СТК	Не менее 6,0	1
10	Стеклотекстолит	СТ	Не менее 1,5	1	Стеклотекстолит	СТ	СТЭФ	СТК	Не менее 1,5	1

Таблица 91 (окончание)

Позиция по рис. 142	Класс В, исполнения У, Т и ХЛ				Классы F и Н, все исполнения; класс В, исполнения Т и химически стойкое					
	Материал			Количество слоев	Материал					Количество слоев
	Наименование	Марка	Толщина, мм		Наименование	Марка для класса			Толщина, мм	
						В	F	Н		
11	Шайба пружинная	Сталь	Не менее 1,0	1	Шайба пружинная	Сталь	Сталь	Сталь	Не менее 1,0	1
12	Лента лавсановая	Тафтяная	0,16	1 вполнахлеста	Лента стеклянная	ЛЭС	ЛЭС	ЛЭС	0,1	1 вполнахлеста
13	Лента стеклослюдинитовая	ЛСПЭ-934 тп	0,13	1 вполнахлеста	Микалента	ЛФС-ТТ	ЛФЭ-ТТ	ЛФК-ТТ	0,17	1 вполнахлеста
14	Лента лавсановая	Тафтяная	0,16	1 вполнахлеста	Лента стеклянная	ЛЭС	ЛЭС	ЛЭС	0,2	1 вполнахлеста
15	Провод выводной	ПРГБ	–	–	Провод выводной	РКГМ	РКГМ	РКГМ	–	–
16	Стеклолакоткань	ЛСП	0,17	1 вполнахлеста	Стеклолакоткань	ЛСБ	ЛСП	ЛСП	0,15	1 вполнахлеста
17	Лента лавсановая	Тафтяная	0,16	1 вполнахлеста	Лента стеклянная	ЛЭС	ЛЭС	ЛЭС	0,1	1 вполнахлеста

интенсивные утечки по жиле и оплетке, что резко снижает сопротивление изоляции машины. Наиболее плотная изоляция получается при применении липкой поливинилхлоридной ленты, которая пригодна для электродвигателей исполнений ХЛ, Т и химически стойкого при условии, что температура на выводном проводе не будет превышать 70 °С. При более высоких температурах следует применять кремнийорганическую самосклеивающуюся ленту ЛЭТСАР. Мохно использовать стеклолакоткани ЛСЛ и ЛСЭ (при температуре на проводе до 105 °С) или стеклолакоткани ЛСП и ЛСТР (при температуре до 155 °С) не менее двух слоев вполнахлеста, закрепляя их сверху ниткой корд (при нагреве до 105 °С и исполнении У) или стеклочулком (при нагреве выше 105 °С а также для машин исполнений Т и химически стойкого) и покрывая затем изоляционными эмалями. На выводные концы с хомутиками дополнительно накладывают изоляцию из киперной, лавсановой или стеклянной ленты вполнахлеста для защиты выводного кабеля от механических повреждений. Ленты закрепляют бандажом из нитки корд или стеклянного шнура. Длина наложения изоляции и бандажа зависит от сечений выводного провода. Самым прогрессивным методом оклетневки является применение термоусаживаемых трубок.

5. ТЕХНОЛОГИЯ ИЗОЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

5.1. Изолирование обмоток

5.1.1. Катушечные обмотки для полуоткрытого паза

Изготовление полукатушечной обмотки для полуоткрытого паза — более трудоемкий процесс, чем изготовление всыпной обмотки, т. к., кроме намотки лодочек и временной увязки витков, добавляются операции пропитки или обволакивания, опрессовывания, растяжки, рихтовки и изолирования лобовых частей. Процесс укладки полукатушечных обмоток в полуоткрытый паз несложен — в каждый паз кладут пазовую коробочку, затем через шлиц последовательно закладывают по две полукатушки нижнего ряда, междуфазную прокладку и две полукатушки верхнего ряда. Во всех случаях под клин необходимо устанавливать прокладку, которая не только повышает уровень пробивного напряжения пазовой изоляции относительно корпуса, но облегчает заклинивание паза и предохраняет изоляцию от повреждения при заклинивании.

5.1.2. Изготовление катушек с непрерывной изоляцией

Процесс изготовления катушек статорных и якорных обмоток с нанесенной на них непрерывной изоляцией еще более трудоемок, чем катушек для полуоткрытого паза. Если требуется усиление изоляции провода, то обычно в процессе намотки лодочек выполняют дополнительную витковую изоляцию в виде прокладок или непрерывную ленточную. Дополнительную непрерывную витковую изоляцию наматывают на провод с ролика изоляционной ленты при изготовлении заготовок из провода при помощи специального приспособления — обмотчика. Заготовки — круглые лодочки — растя-

гивают впродолговатые и после предварительного опрессовывания их пазовой части пропитывают или компаундируют. Пазовые части опрессовывают при разогреве лодочек и последующем их охлаждении в прессе. Температура разогрева зависит от применяемых пропиточных составов, обычно она составляет 120–140 °С. Давление при опрессовывании должно быть 2–4 МПа. Время опрессовывания при нагреве 10–30, при охлаждении 10–20 мин. В случае применения проводов марки ПЛС, изоляция которых склеивается под воздействием повышенной температуры и давления, лодочки подвергают опрессовыванию при 150–160 °С после наложения защитной ленты. Для получения соответствующего натяжения при намотке и предотвращения разогрева изоляции провода ПЛС при проходе его через плашки провод наматывают с помощью приспособления, состоящего из двух направляющих и одного натяжного роликов (рис. 143). Намотанную продолговатую лодочку защищают от технологических воздействий, т. е. накладывают защитную ленту и опрессовывают, растягивают в катушки и рихтуют, после чего снимают ленту. Временная лента не нужна, если применяют лавсановую ленту, которую накладывают до пропитки или компаундирования и опрессовывания лодочки, а затем оставляют на катушке и она входит в состав корпусной изоляции. Корпусную изоляцию наносят ручным или механическим способом. Лента с натяжением перемещается вокруг изолируемой части по спирали. Обычно применяют

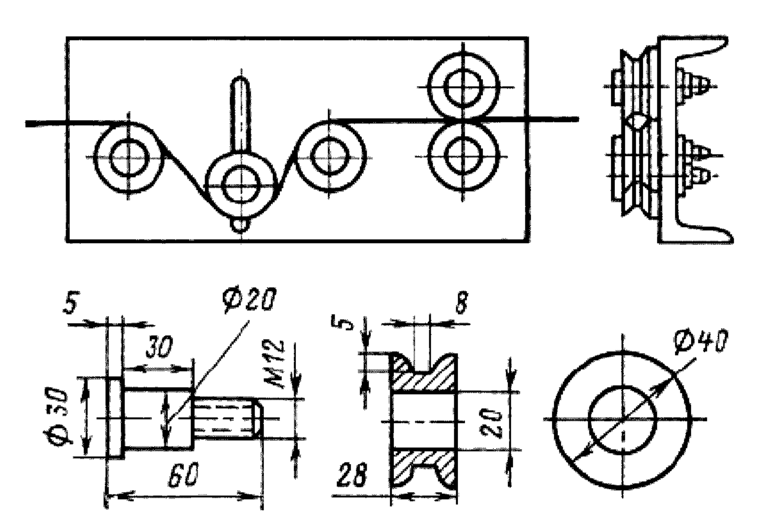


Рис. 143. Приспособление для намотки проводов со стеклослюдинитовой изоляцией

ленты шириной 20 мм. При больших сечениях катушек (например более 60 мм) на прямых частях целесообразно использовать ленты шириной 25–30, при малых сечениях и на уголках — 15 мм. Статорные катушки изолируют в такой последовательности: сначала накладывают изоляцию на выводные концы, а затем изолируют головки и лобовые части. При этом изоляцию не доводят до уголков на 10–15 мм и сводят к уголкам на конус на длине 30–40 мм. После наложения текстильных лент на лобовые части прибандажируют выводные концы к лобовой части. После этого изолируют пазовые части непрерывно от одной лобовой части к другой. Аналогично изолируют и якорные катушки. Число слоев изоляции зависит от рабочего напряжения машины, условий ее работы, толщины и типа изоляционных лент. Поверх основной изоляции накладывают защитный слой из лавсановой, хлопчатобумажной или стеклянной ленты в пазовой части встык, в лобовой — вполнахлеста. При изолировании катушек на станке на выводные концы и лобовые части изоляцию накладывают вручную, машинному изолированию подлежат только пазовые части и уголки. После изолирования статорные катушки высокого напряжения подвергают пропитке эпоксидным компаундом, компаундированию или гидростатическому опрессовыванию, якорные — пропитке лаками или эпоксидным компаундом.

5.1.3 Изолирование катушек с «мягкой» и «твердой» гильзой

При наложении изоляции на катушки наиболее простым и наименее трудоемким изолировочным процессом является изготовление корпусной изоляции статорных и якорных катушек с «мягкой» гильзой. Однако в силу технологических особенностей такую изоляцию рекомендуется наносить на катушки с длиной пазовой гильзы не более 500 мм. На лобовые части наносят вполнахлеста непрерывную изоляцию из микаленты, стеклослюдинитовой ленты, слюдопластоленты или стеклолакоткани, после чего пазовые части обертывают простынками из гибкого миканита, стекломиканита или пленкосинтокартона, которые в нескольких местах временно закрепляют, затем по всей длине катушки или полукатушки накладывают лавсановую, хлопчатобумажную или стеклянную ленты (в пазовой части встык, в лобовой — вполнахлеста). Катушки после изолирования обязательно пропитывают лаками с последующей сушкой. Же-

лательно, чтобы пропиточные лаки по химическому составу были близкими к лакам, входящим в состав изоляционных материалов. Рекомендуется во избежание появления хрупкости изоляции лаки в катушках сушить не до конца, а подсушивать перед пропиткой уложенных в статор или якорь обмоток. «Мягкая» гильза применяется лишь для катушек обмоток низкого напряжения. Катушки обмоток высокого напряжения изготовляют только с «твердой» гильзой. Лобовые части катушки изолируют заранее до нанесения на пазовые части «твердой» гильзы. Наиболее ответственным в катушках с «твердой» гильзой является место перехода от пазовой части к лобовой. На рис. 144 показано, как изолируют переходы в катушках на напряжение 3300 В. Предварительно изолируют несколькими слоями микаленты, стеклослюдинитовой ленты или лакоткани выводные концы и лобовые части катушки, причем первый слой заходит на прямую часть от уголка на 25–40 мм. Все последующие слои накладывают «на конус» ступеньками от конца каждого слоя со сдвигом приблизительно 12 мм. Лобовые части, затем подвергают сушке и пропитке лаками. Размеры простынки микафолия, слюдопластофолия или слюдинитофолия для пазовой части рассчитывают таким образом, чтобы при обертывании катушки простынка последовательно перекрывала уступы ленточной изоляции. Простынка обычно представляет собой трапецию, у которой разность между большим и меньшим основаниями составляет 50-80 мм. Пазовую часть катушки обертывают простынкой вручную, желательно при этом нагревать изоляцию до 60–80 °С, затем сторону катушки закладывают в обкаточный станок (рис. 145) для горячего обкатывания

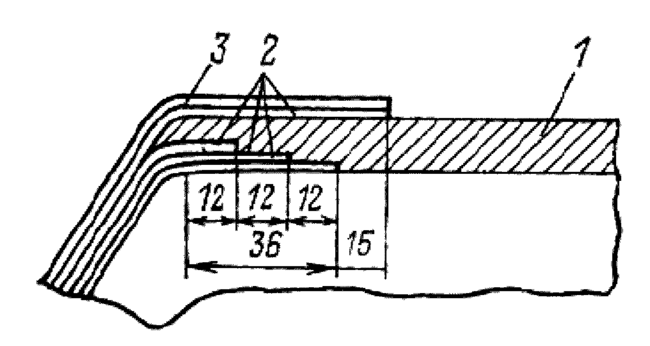


Рис. 144. Катушка с гильзовой изоляцией на напряжение 3300 В:
1 — гильза из микафолия; 2 — микалента; 3 — лавсановая лента

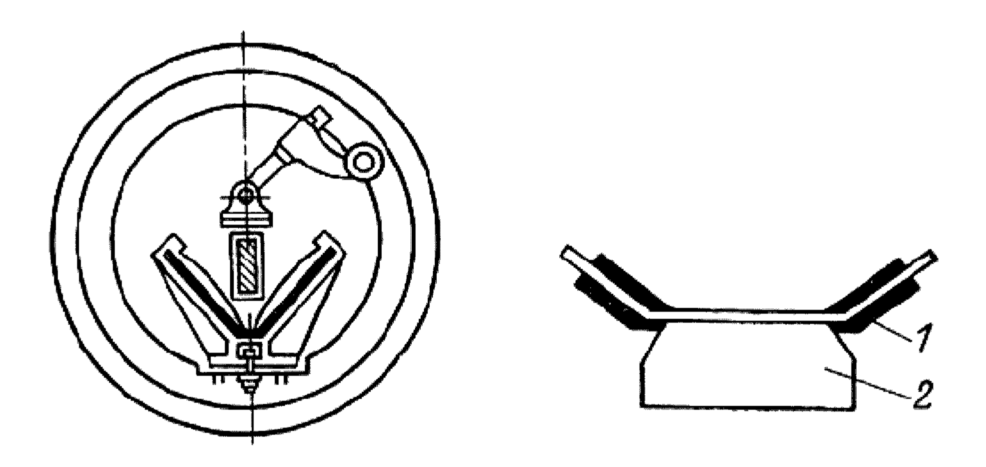


Рис. 145. «Утюги» для обкатывания гильзы

изоляции. Температура «утюгов» для обкатки зависит от применяемых материалов (клеящих лаков). Для микафолия на шеллачном лаке температура «утюгов» должна быть 150–160, на глифталевом — 170–180, а для микафолия на кремнийорганическом лаке и изоляции слюдотерм — 200–240 °С. Время обкатки микафолиевой гильзы зависит от эластичности материала и количества слоев. Немедленно после окончания обкатки гильзовую изоляцию подвергают опрессовыванию. Желательно при этом сначала нагревать изоляцию, а затем охлаждать (для кремнийорганической изоляции это обязательно), но возможно и опрессовывание в холодных прессах (для слюдотерма). Давление при опрессовывании следует поднимать постепенно до 2,5–5,0 МПа. После наложения гильз окончательно изолируют лобовые части катушек. Якорные катушки или полукатушки изолируют так же, как статорные, но в этом случае время обкатки гильзы меньше, т. к. толщина изоляции якорных катушек невелика. При изготовлении гильзовой изоляции на основе слюдотерма значительно сокращают время обкатки гильзы, т. к. в дальнейшем изоляцию катушек подвергают гидростатическому опрессовыванию в битуме при давлении 0,7–0,8 МПа и запеканию при 155–160 °С. Предварительно обмотку вакуумируют при остаточном давлении не более 2,6 кПа в течение 1 ч.

При изготовлении корпусной изоляции «монолит» для витковой изоляции применяют провода ПСД или ПЛС. Для увеличения монолитности витковой изоляции иногда перед нанесением корпусной изоляции заготовку промазывают эпоксидным компа-

ундом и запекают. Затем на растянутую катушку наносят необходимое количество слоев непропитанной стеклослюдинитовой или стеклослюдопластовой ленты, после чего катушки пропитывают эпоксидным компаундом сначала в глубоком вакууме, затем под давлением. После извлечения катушек из автоклава их подвергают «вызреванию» — выдержке на воздухе при температуре помещения или в термошкафу с циркуляцией воздуха при 45–50 °С до исчезновения отлипа на их поверхности. Такие катушки, изготовленные «мокрым способом», укладывают в статор и запекают. Более производительна пропитка обмотки статора после укладки в него непропитанных катушек. При этом статор помещают в автоклав, где обмотки вакуумируют и пропитывают эпоксидным компаундом, затем запекают.

Температурные режимы пропитки, отверждения и окончательной термообработки определяются типом обмотки и свойствами пропиточного состава. Подробно они изложены ниже в параграфе о компаундировании обмоток. Якорные и роторные обмотки после пропитки эпоксидным компаундом сушат в первые часы при вращении с частотой 20–30 $мин^{-1}$.

5.1.4. Изготовление стержней роторов асинхронных двигателей

Стержни роторов изготовляют из одной или двух медных полос прямоугольного сечения, причем верхние стержни на 20–30 мм длиннее нижних. Нарезанные заготовки рихтуют, а затем у них с одной стороны отгибают и формуют лобовую часть. После лужения концов стержней пазовую часть изолируют «твердой» гильзой. Длину нарезанной заготовки для изоляции пазовой части определяют по выражению:

$$L = P_{ср}Bk/(2t), \qquad (5.1)$$

где $P_{ср}$ — длина среднего периметра изоляции роторных стержней; B — толщина изоляции на обе стороны; t — толщина изоляционного материала; k — коэффициент, учитывающий усадку материала при опрессовывании стержней, для микафолия и стекломикафолия $k = 1$; слюдинитофолия и слюдопластофолия k зависит от технологии опрессовывания стержней и равен 1,1–1,15 при опрессовывании в холодном и 1,20–1,35 при опрессовывании в нагретом прессе.

При изолировании заготовку, имеющую форму усеченного конуса, помещают на плиту и навертывают в 1–1,5 оборота на стержень, который после этого помещают в обкаточный станок, где заготовку полностью навертывают на стержень и обкатывают. Температура нагрева «утюгов» обкаточного станка при гильзе из микафолия на шеллачном лаке составляет 150–160, на глифталевом (ГФ-957) 150–170 °С. Продолжительность обкатки изоляции зависит от применяемых материалов и толщины наносимой изоляции. Для микафолия на шеллачном и глифталевом лаках и стекломикафолия она составляет 3–5 мин в зависимости от толщины, для слюдопластофолия и слюдинитофолия — 1 мин. Затем пазовую изоляцию подвергают опрессовыванию. Давление при опрессовывании должно быть не менее 5 МПа. Микафолиевую изоляцию на шеллачном и глифталевом лаках, слюдопластофолиевую на глифталевом или глифтальбакелитовом лаках и слюдинитофолиевую можно опрессовывать в холодном прессе после немедленного переноса в него разогретого при обкатке стержня. Микафолиевая изоляция на кремнийорганическом лаке обязательно должна опрессовываться в прессе при 200–220 °С в течение 20–30 мин и последующем охлаждении в нем. При изготовлении стержней слюдинитофолием или слюдопластофолием следует учитывать усадку материала при опрессовывании, особенно в горячих прессах (рис. 146). Причем усадка слюдопластофолия несколько меньше, чем слюдинитофолия.

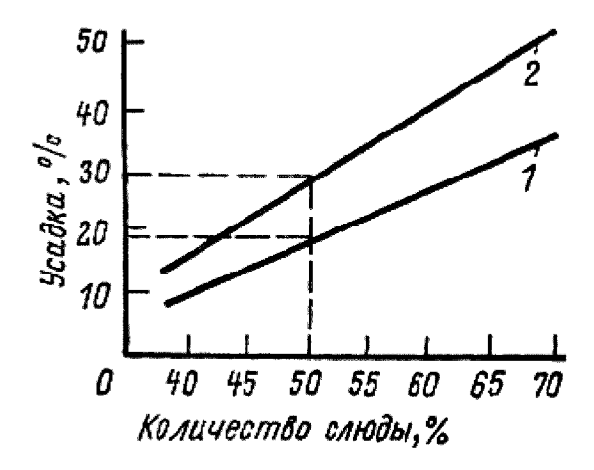


Рис. 146. Усадка слюдинитофолия при изготовлении твердых гильз роторных стержней: 1 — при холодном опрессовывании обкатанной горячими «утюгами» изоляции; 2 — при горячем опрессовывании

Слюдинитофолиевая и слюдопластофолиевая изоляции, опрессованные в горячем прессе, более монолитны, имеют более высокие пробивное напряжение и влагостойкость. После нанесения «твердых» гильз изолируют лобовые части лентами, обычно вполнахлеста, при этом следует следить за тем, чтобы в месте стыка пазовой и лобовой частей не было ни просветов, ни утолщений. На ряде заводов сначала изолируют лобовую часть, затем накатывают гильзу. Однако при этом трудно получить нужную толщину стыка, и при пробое в месте стыка затрудняется ремонт изоляции.

5.1.5. Изготовление полюсных катушек синхронных генераторов

Роторные катушки синхронных явнополюсных машин наматывают из полосовой меди на ребро на специальных станках. Для снятия наклепа катушки после намотки подвергают отжигу при 500–600 °С с последующим резким охлаждением в воде. Утолщение на внутренней половине широкой части меди в местах изгиба снимают опрессовыванием на гидравлическом прессе и при необходимости напильником, если гибочный станок не имеет ножей, снимающих утолщение в процессе намотки. Затем катушку рихтуют. Заготовки катушек опрессовывают до изолирования давлением 150 МПа. Изоляция, прокладываемая между витками, представляет собой один слой асбестовой бумаги толщиной не менее 0,3 мм или два слоя по 0,2 мм. Существуют два способа прокладки витковой изоляции. Первый — менее производительный, но дающий минимальные отходы асбестовой бумаги, второй — более производительный, но с большими отходами бумаги. При первом способе полоски асбестовой бумаги шириной на 2–3 мм больше ширины витка приклеивают глифталь-бакелитовым лаком (с содержанием нелетучих 40–50 %) к витку и промазывают поверхность бумаги, затем катушки сушат в растянутом состоянии на воздухе 5–6 ч, после чего запекают под давлением на оправке. При втором способе медь катушек окунают в жидкий глифталевый или бакелитовый лак и после подсушки его на воздухе (30–60 мин) между витками прокладывают листы асбестовой бумаги, пропитанной лаком ГФ-95. Бумагу пропитывают стопками по 150–200 листов. Стопки высотой 10–15 мм сушат при 105–110°С 20–30 мин. Прокладываемые между витками листы асбестовой бумаги имеют несколько большие размеры, чем

поперечное сечение катушки. Листы имеют разрез в месте перехода витка в другой. В местах разреза наклеивают бакелитовым лаком пластинки слюды.

После прокладки асбестовой бумаги катушку на оправке затягивают болтами, затем нагревают в печи или током до 180–200 °С, подпрессовывают и снова запекают до полного прекращения выделения лака на наружной поверхности катушки и исчезновения его отлипа. Время запекания в печи 15–60 мин; при нагреве током его плотность должна быть в пределах 20–30 А/мм^2. Катушки опрессовывают давлением, соответствующим давлению от центробежных сил при угонной частоте вращения, но не менее 5 МПа. В случае печной сушки их снова запекают при 180–200 °С и повторяют опрессовывание и запекание до 3 раз, причем после каждого опрессовывания время запекания увеличивают; при токовом нагреве опрессовывание обычно производят непрерывно в течение всего процесса запекания. Суммарное время запекания зависит от применяемых лаков; для лака ГФ-95 оно может достигать 8 ч.

В катушках с изоляцией класса нагревостойкости F желательно применение эпоксидно-полиэфирных лаков, с изоляцией класса H — раствора кремнийорганической смолы К-42; в последнем случае время запекания составляет 8 ч при 220–250 °С. При окончательном опрессовывании катушки охлаждают, не снимая давления, и зачищают от излишков изоляции и наплывов лака. Первый и последний витки катушки создают ступенчатостью торцевых плоскостей, а они должны быть перпендикулярны оси и не иметь «ступенек», вызывающих механическое повреждение (продавливание) изоляции. В катушках из медной ленты толщиной до 2 мм для получения параллельных торцевых поверхностей и исключения «ступеньки» крайний виток спиливают. В катушках из ленты, проволоки или шины большей толщины витки выгибают на специальном гибочном шаблоне и в текстолитовых рамках прорезают скосы, где размещают концы последнего витка. Более простой способ выравнивания торца катушки: перед тем как поместить катушку на оправку для запекания, на ее торцевые плоскости наносят слой массы, состоящей из 50 % асбестового волокна и 50 % полимеризующегося лака (для изоляции класса нагревостойкости B — клей БФ-2 или БФ-4), защищенный от прилипания к оправке слоем асбестовой бу-

маги. Запекание и опрессовывание массы и всей катушки производят одновременно. Катушки получаются со строго параллельными торцевыми поверхностями и без «ступеньки».

Готовые катушки должны издавать при постукивании металлический звук. Поверхность катушек покрывают эмалью ГФ-92ГС, ЭП-91 или КО-935 в зависимости от класса нагревостойкости изоляции с последующим запеканием.

5.2. Изолирование элементов конструкций

5.2.1. Изолирование сердечников полюсов

Очищенную под изоляцию поверхность сердечника покрывают клеящим лаком и просушивают. Соответствующим клеящим лаком покрывают также одну сторону изоляционного материала, обычно формовочного миканита, формовочного слюдопласта, микафолия или слюдопластофолия. Затем изоляцию постепенно навертывают на сердечник при горячей обкатке каждого слоя для обеспечения ее монолитности. Если машины предназначены для тяжелых эксплуатационных условий, изоляцию дополнительно подвергают опрессовыванию в горячих пресс-формах и последующему запеканию. Температура запекания зависит от изоляционного материала (для материалов на шеллаке 150–160; на глифталевой смоле 170–180; на кремнийорганических смолах 220–240 °С). Время запекания в зависимости от размеров сердечника и толщины материала может колебаться от 2 до 6 ч. Поверхность изоляции обычно покрывают эмалью (ГФ-92ГС, ЭП-91 или КО-935) с последующим запеканием. На некоторых заводах изоляцию сердечников полюсов выполняют коробами из прокладочного миканита (рис. 147) с прокладками из твердых изоляционных материалов (гетинакса, стеклотекстолита). Прокладочный миканит выбран в качестве основного материала изоляции потому, что он имеет достаточную механическую и электрическую прочность, влагостойкость, сравнительно недефецитен и дешев. Кроме того, из нагретого миканита легко формируются такие детали, как короба. Запекать их не требуется, т. к. в процессе изготовления прокладочного миканита смола, входящая в его состав, достаточно полимеризуется. С целью предохранения от выветривания слюды в процессе эксплуатации, а также для повышения

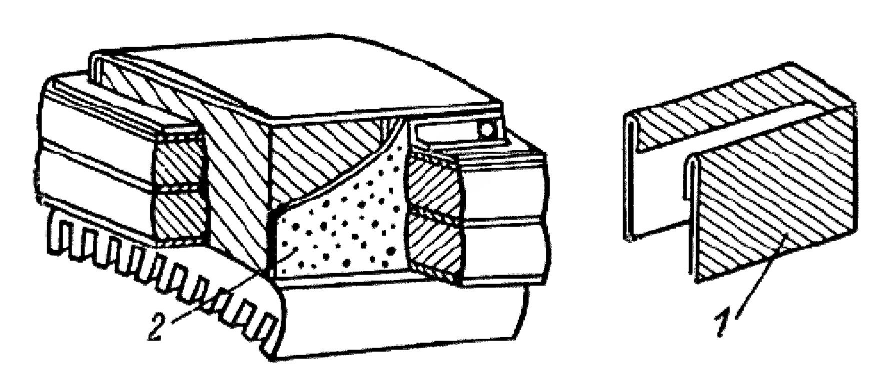


Рис. 147. Изоляция сердечников полюсов: 1 — короб; 2 — прокладка

механической прочности коробов заготовки миканита предварительно оклеивают снаружи стеклянной тканью. Ткань следует загибать на внутреннюю сторону заготовки на 30–40 мм. Для приклейки можно применять эмаль ГФ-92ГС. Короба изготовляют следующим образом. Среднюю часть заготовки разогревают на плите до размягчения, формуют на сердечнике полюса металлическим шаблоном и охлаждают. Прокладками из слоистого пластика перекрывают стыки коробов. Для придания изоляции монолитности все части конструкции приклеивают к сердечнику полюса и склеивают между собой клеем холодного отверждения или клеем, быстро отверждающемся при повышенных температурах. В частности, применяют эпоксидный клей холодного отверждения, состоящий из эпоксидного лака и отвердителя — полиэтиленполиамина. Состав эпоксидного лака: эпоксидная смола ЭД-20 или ЭД-22-72, дибутилфталат — 11, толуол — 17 мас. ч.

Полиэтиленполиамин добавляют к лаку в количестве 10–12 мас. ч., непосредственно перед его использованием, т. к. срок жизни последнего после введения отвердителя 2–3 ч при 20 °С.

5.2.2. Изготовление узлов контактных колец

Наиболее трудоемкой, но самой надежной является твердая изоляция втулок контактных колец формовочным миканитом, формовочным слюдопластом, формовочным слюдинитом (при этом верхний слой должен быть из формовочного миканита) или чередующимися слоями бакелизированной намоточной бумаги и формовочного миканита. При всех сочетаниях материала технология изолирования одинакова.

Длину заготовок определяют по выражению:

$$l = \pi d_{ср} m / d, \qquad (5.2)$$

где $d_{ср}$ — средний диаметр изоляционного слоя, мм; m — толщина изоляции втулки, мм; d — толщина изоляционного материала, мм.

При этом следует учитывать припуск на обработку, а в случае формовочных слюдопластов и слюдинитов их усадку. Ширина заготовки равна ширине изоляции плюс 15–20 мм на обрезку кромок.

Втулку до изолирования зачищают, ее цилиндрическую поверхность промазывают бакелитовым, шеллачным, глифталевым (ГФ-957) или кремнийорганическим лаком. После сушки лака на втулку плотно накатывают на горячей плите заготовку, внутреннюю поверхность которой предварительно лакируют. Следущая операция состоит в опрессовывании изоляции в пресс-массе с конусными сегментами (рис. 148). Пресс-форму предварительно смазывают оссагалином, в нее закладывают втулку с нанесенной изоляцией и помещают в печь для разогрева при 150–160 °С на 30–50 мин. (В случае применения гибкого слюдинита температура разогрева 100–110 °С). После предварительного разогрева кольцо пресс-формы натягивают с такой силой, чтобы давление на поверхности изоляции было не менее 15 МПа.

Если угол на пресс-форме равен 38°, сила натяжения, Н:

$$P = 190 d_{ср} L, \qquad (5.3)$$

где L — ширина заготовки, мм.

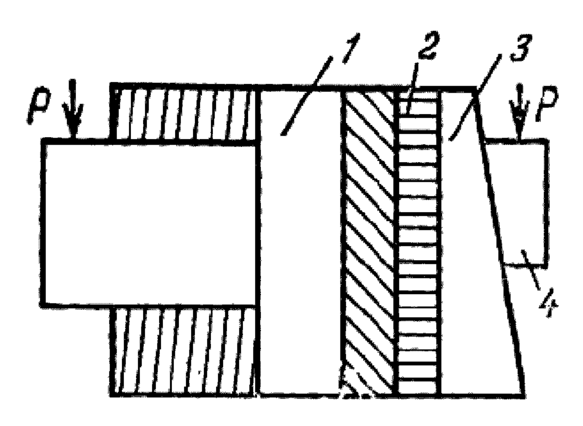


Рис. 148. Опрессовывание изоляции втулки контактных колец: 1 — втулка; 2 — изоляция; 3 — вкладыши пресс-формы; 4 — прессовочное кольцо

Затем производят запекание при температуре, которая зависит от примененных в изоляционных материалах лаков: для шеллачного 150–160, для глифталевого (ГФ-957) 170–180, для кремнийорганического 200–220 °С.

Время запекания определяется толщиной изоляции, размерами втулки, тепловой мощностью печи, количеством загруженных деталей и применяемых материалов и может колебаться в пределах 1–4 ч. После запекания изоляция должна быть плотной и издавать металлический звук при простукивании. После выемки пресс-формы из печи, ее охлаждения и извлечения втулки поверхность изоляции протачивают до чертежного размера. Контактные кольца насаживают на ступицу после их разогрева до 450 °С, при этом между кольцами устанавливают пластмассовые кольца. В эксплуатации наблюдаются случаивыхода из строя электродвигателей из-за пробоя изоляции узла контактных колец вследствие попадания между пластмассовыми и контактными кольцами щеточной пыли, образующей проводящие мостики, поэтому возникла тенденция опрессовывания узлов контактных колец пластмассой. При этом устраняются зазоры, исключаются усадка изоляции, ослабление посадки и разбалтывание контактных колец. Пластмасса должна обладать достаточной механической прочностью и нагревостойкостью и не давать усадки при остывании после запрессовывания и в процессе эксплуатации, а также быть влагостойкой, искростойкой и обладать высокой электрической прочностью. При подборе пластических масс и режимов опрессовывания узлов контактных колец установлено, что этим требованиям вполне отвечает пресс-масса АГ-4В. В некоторых случаях возможно применение смеси асбодина с меламиноформальдегидным пресс-порошком К-78-51 (в соотношении 3:1). При применении этих пресс-масс температура при прессовании 160–170 °С, время 15–25 мин, усилие 40–45 МПа. Опрессованные узлы, особенно с асбодино-меламиновой изоляцией, запекают при 160–180 °С в течение 12–16 ч. Узлы контактных колец небольших диаметров (50–70 мм) можно опрессовывать пластмассой У4-080-02.

5.2.3. Изготовление коллекторных манжет (конусов)

Миканитовые манжеты, изолирующие коллекторные пластины от нажимных конусов, — весьма ответственная изоляционная

деталь, требующая тщательнейшего соблюдения технологии изготовления. При диаметрах нажимных конусов до 600 мм изготовляют целые манжеты, при больших диаметрах — отдельные сегменты. Для изготовления манжет заготовки из формовочного миканита вырезают по шаблону и отбирают в необходимом количестве на каждую манжету. Количество заготовок зависит от номинальной толщины манжеты и фактической толщины формовочного миканита. Их суммарная толщина должна равняться 1,15 номинальной толщины манжеты с учетом усадки миканита при изготовлении манжеты. Заготовки на одну манжету помещают на горячий стальной лист и нагревают несколько минут до размягчения смолы в миканите (для равномерности нагрева заготовки рекомендуется переворачивать). После этого зубцы разогретых заготовок загибают на холодном пуансоне пресс-формы, затем половину заготовок покрывают маловязким лаком (шеллачным, глифталевым, полиэфирным или кремнийорганическим в зависимости от марки применяемого формовочного миканита) и подсушивают на воздухе. Пресс-форму для манжет загружают в печь для предварительного прогрева. Время прогрева зависит от размеров и количества пресс-форм, а также от тепловой мощности и температуры печи. Горячую матрицу пресс-формы покрывают смазкой, выкладывают телефонной или пергаментной бумагой, после чего закладывают в нее миканитовые заготовки, чередуя через одну лакированные и нелакированные и сдвигая их на $^1/_3$ или $^1/_4$ зубца. Затем снова прокладывают лист бумаги, вставляют горячий пуансон, покрытый смазкой, и предварительно опрессовывают заготовки (рис. 149). После этого пресс-форму с заготовками помещают на запекание в печь. Температура запекания зависит от марки примененного формовочного миканита, а время — от марки и толщины манжеты. Если применен формовочный миканит на шеллачном лаке, можно запекать манжеты в течение 8–30 мин при температуре пресс-формы 150–160 °С, для миканита на глифталевом лаке температура должна быть повышена до 170–180, на кремнийорганическом — до 220–240 °С, а время запекания 3–6 ч. В результате запекания манжета должна приобрести жесткость, но не быть хрупкой. Немедленно после выгрузки из печи манжету опрессовывают окончательно.

Силу, необходимую для опрессовывания, Н, определяют по выражению:

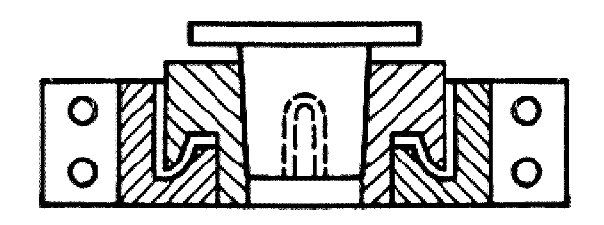


Рис. 149. Пресс-форма для опрессовывания коллекторных манжет

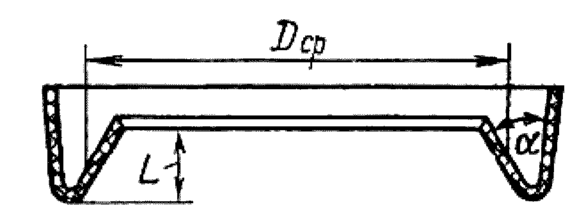


Рис. 150. Разрез манжеты коллектора

$$Q = P \pi D_{ср} L \, \mathrm{tg}\, \alpha, \qquad (5.4)$$

где P — давление, равное 30–32 МПа; $D_{ср}$ — средний диаметр конуса (рис. 150), см; α — угол конуса.

При изготовлении манжет из формовочного слюдинита перед каждой операцией опрессовывания манжет следует охлаждать пресс-форму с манжетой до 85–95 °С. При изготовлении манжет из формовочного слюдопласта должны быть подобраны соответствующие температура и давление. После остывания пресс-формы обрезают края манжеты, затем ее извлекают из пресс-формы и зачищают от остатков бумаги.

5.2.4. Изготовление коллекторов

Широкое внедрение электродвигателей во все сферы человеческой деятельности вызывает необходимость как увеличения конструкторских и технологических исполнений, так и улучшения их эксплуатационных и экономических показателей. Высокое качество электродвигателей, их эксплуатационная надежность и снижение трудоемкости изготовления в большой степени зависят от правильно построенного технологического процесса, соответствующего уровню современной технологии, обеспеченной необходимым технологическим оборудованием и оснасткой. В процессе совершенствова-

ния конструкции электродвигателей постоянного тока претерпевали изменения все узлы и детали, в частности серьезные изменения претерпел узел, выплняющий функцию коммутации между якорем и статором. На протяжении длительного времени были опробованы разные материалы и конструктивные решения, в результате чего был получен современный щеточно-коллекторный узел. Работа щеточно-коллекторного узла связана с воздействием трех групп факторов, связанных с электромагнитными процессами, физико-химической природой, скользящего контакта, механическими воздействиями и температурным нагревом. К факторам электромагнитного характера относятся условия коммутации: электромагнитные нагрузки, напряжения между смежными пластинами, реактивная э. д. с., токовые перегрузки, в значительной мере определяемые настройкой добавочных полюсов.

Факторы физико-химической природы скользящего контакта определяются условиями токосъема (состояние контактной пленки на поверхности коллектора) и состоянием окружающей среды.

Факторы механического воздействия определяются технологическими и конструктивными особенностями машины (ослабление прессовки, эксцентриситет и эллиптичность коллектора, марка щеток и материал коллектора, технология сборки и изготовления, давление на щетку, частота вращения). При этом наиболее опасными причинами нарушения работы щеточно-коллекторного узла остаются причины, вызванные влиянием факторов именно механического воздействия. Одними из основных причин механического воздействия, нарушающими работу щеточно-коллекторного узла являются: разрушение щеток вследствие нарушения цилиндричности коллектора, т. е. наличия выступающих коллекторных пластин, а также искрение под щетками и круговой огонь вследствие биения, эллиптичности и эксцентриситета коллектора.

Коллектор представляет собой самый сложный и ответственный узел электрической машины, что объясняется, во-первых, конструкцией кольца, составленного из большого количества медных пластин, чередующихся с изоляционными прокладками, во-вторых, сложными геометрическими формами сопряжения металлических и изоляционных деталей и, наконец, силовыми явлениями, возникающими под действием центробежных сил и температурных изменений.

Для обеспечения хорошей коммутации биение коллектора в готовой машине должно быть не более 0,03–0,04 мм. Если учесть, что половина этого значения обусловливается зазором подшипников и эксцентриситетом подшипниковых щитов, то на долю допустимого биения коллектора остается 0,007–0,01 мм.

При разработке технологических процессов изготовления коллекторов необходимо обеспечить монолитность конструкции и способность сохранять геометрическую форму в течение эксплуатации.

Коллекторы изготовляют из специальной коллекторной меди, нарезанной или отштампованной на пластины нужного размера. Перед закладкой изоляции пластины тщательно рихтуют, а прокладки из коллекторного миканита, коллекторного слюдинита или коллекторного слюдопласта калибруют по толщине. Сборку коллекторных пластин и закладку изоляции производят в специальном кольце на плите. Заготовку коллектора обкладывают плашками запрессовочного приспособления, распределенными равномерно по всей окружности, и накладывают запрессовочное кольцо (рис. 151). После напрессовки кольца приспособление переворачивают и проверяют перпендикулярность пластин коллектора к запрессовочному кольцу по угольнику; затем коллектор запрессовывают на прессе.

Давление на запрессовочное кольцо, Н, определяют по выражению:

$$QF=+200(P\,tg\,\beta\rho), \qquad (5.5)$$

где F — боковая поверхность пластин коллектора, $см^2$; P — давление между пластинами, P = 35 МПа; b — угол образующей конуса плашек, b = 4÷5°; r — угол трения для стали по стали, r = 14 ÷ 15°.

Отсюда, следует:

$$QF=2\ p\cdot 350\ tg19^{\circ} = 765F. \qquad (5.6)$$

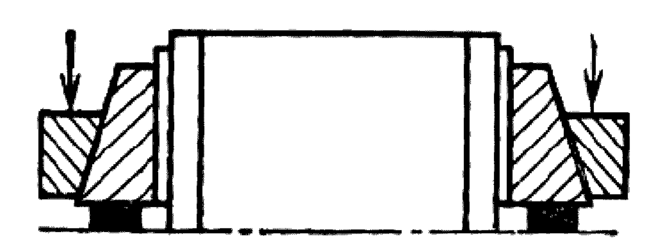


Рис. 151. Запрессовка коллектора

После запрессовывания коллектор с приспособлением помещают в печь и запекают при 170–180 °С в случае применения коллекторных миканитов на шеллачном и глифталевом лаках, при 220–240 °С — для коллекторного миканита на кремнийорганическом лаке и аммофосе. Время запекания в пределах 2–4 ч. После выгрузки из печи на кольцо приспособления вновь подают давление, затем коллектор с приспособлением охлаждают до 40–50 °С и снова прессуют. В охлажденной в приспособлении заготовке коллектора производят расточку с двух сторон ласточкиного хвоста, покрытие обработанных поверхностей эмалью ГФ-92ГС, ЭП-91 или КО-935 с последующим запеканием. Далее выполняют общую сборку коллектора. Манжеты подрезают по технологическому кольцу и слегка подогретыми надевают на нажимной конус. На изолированную втулку надевают заготовку коллектора с кольцом, нажимные конусы с манжетами и предварительно затягивают гайку коллектора или гайки стяжных шпилек вручную, после чего запекают коллектор. Температура и время запекания зависят от примененных материалов и размеров коллектора. Для материалов на шеллачном лаке температура должна быть 150–160, на глифталевом 170–180, на кремнийорганическом и аммофосе 220–240 °С. Время запекания в зависимости от толщины изоляции и размера коллектора составляет 2–8 ч. Немедленно после выемки из печи манжеты запрессовывают в коллектор с помощью специального приспособления. Усилие запрессовывания должно обеспечивать давление на миканитовые манжеты не меньше, чем при их изготовлении. Если манжеты изготовлены из коллекторного слюдинита, перед запрессовыванием коллектор должен быть охлажден до 85–95 °С. После охлаждения запрессованного коллектора с него снимают приспособление и производят расточку поверхности, а также фрезеровку и лужение пазов под петушки. Немедленно после лужения разогретый коллектор вновь опрессовывают с помощью специального приспособления, гайку затягивают до отказа. Крупные коллекторы быстроходных машин запекают до 3 раз, наружные обжимные кольца снимают после второго запекания. На выступающую часть манжет накладывают бандаж, который покрывают эмалью. Готовые коллекторы подвергают динамической формовке, чтобы обеспечить сохранение правильности их формы в процессе эксплуатации. Коллектор нагревают до 150–160 °С, надевают на оправку

разгонного станка и вращают в течение 10–30 мин при 150–160 °С с частотой, равной 1,5 номинальной для данного коллектора.

В тяговых электродвигателях всех вновь проектируемых электровозов применяют коллекторные профили из медно-кадмиевого сплава (бронзы) БрКд-1. По сравнению с серийно используемой коллекторной медью с присадкой серебра (сплав МС-1) этот материал обеспечивает снижение интенсивности износа коллекторов и щеток в 2–2,5 раза. Он имеет низкий коэффициент трения и высокую стойкость к образованию наволакивания меди. Скользящая пара сплав БрКд-1 и щетки марки ЭГ-61А обеспечивают пробеги без обточки коллекторов грузовых электровозов не менее 600 тыс. км, а пассажирских 0,8–1,0 млн км. И еще, что необходимо сделать в первую очередь — это повысить стабильность качества электрощеток ЭГ-61А. Данная марка — лучшая из отечественных для тяговых двигателей магистральных электровозов по своим техническим параметрам — допустимой плотности тока, коэффициенту трения, механической прочности — она не уступает, а по некоторым параметрам превосходит электрощетки ведущих зарубежных фирм. Однако в последние годы наблюдается нестабильность технических характеристик электрощеток серийного производства. Определенные резервы повышения надежности щеточно-коллекторного узла заложены в дальнейшем совершенствовании его конструкции и технологии изготовления. Прежде всего необходимо повысить поверхностную электрическую прочность и трекингостойкость изоляционных деталей — пальцев кронштейнов щеткодержателей, изоляционного вылета манжеты конуса коллектора. На современных электровозах внедряется регулируемая система вентиляции, и тяговые двигатели большую часть времени работают при сниженном расходе обдуваемого воздуха до 1/3 номинальной величины. К сожалению, это приводит к недостаточно интенсивному выносу электропроводящих продуктов износа щеток, их осаждению на изоляционных деталях и при сопутствующем увлажнении — к поверхностному электрическому перекрытию.

5.2.5. Изготовление коллекторов с применением пластмассы

При изготовлении коллекторов с пластмассовым корпусом собранный пакет пластин с изоляцией помещают в запрессовочное приспособление и опрессовывают сборочным кольцом на гидравли-

ческом прессе в холодном состоянии. Сила опрессовывания должна обеспечить необходимое давление между пластинами; при ее расчете следует учитывать падение арочного распора в процессе опрессовывания коллектора пластмассой и ее термообработки. Силу опрессовывания P, Н, определяют по выражению:

$$P = 10\pi f_k b D_k p\left[1+\frac{E_y F}{(1-\alpha)E_п F_k}\right]\frac{F}{R}, \qquad (5.7)$$

где f_k — коэффициент трения между сборочным кольцом и конусными сегментами с учетом угла сегментов, равного 4°, $f_k = 0{,}32$; D_k — диаметр рабочей поверхности коллектора, мм; b — коэффициент, учитывающий снижение арочного распора при опрессовывании пластмассой и термообработке, при опрессовывании в холодном состоянии $b = 5$, горячем — $b = 1{,}5$; p — давление между пластинами, МПа; E_y — модуль упругости изоляции; $E_п$ — модуль упругости пластмассы; a — коэффициент заполнения коллектора медью; F — площадь боковой поверхности пластин, мм²; F_k — площадь поперечного сечения пластмассового кольца с учетом стальной армировки, мм²; R — радиус инерции пластины коллектора, мм.

Выражение в квадратных скобках учитывает снижение арочного распора при снятии сборочного кольца. Давление между пластинами подбирают, пользуясь кривыми рис. 152 и 153, с учетом диаметра коллектора, окружной скорости при испытании, коэффициента заполнения медью и используемых материалов.

Пакет пластин для пластмассовых коллекторов опрессовывают в холодном состоянии. Процесс усадки и запекания изоляционных прокладок происходит при опрессовывании пластмассового корпуса, когда вследствие созданного арочного распора и температурного расширения меди между пластинами коллектора создается давление примерно 30 МПа при 140–180 °С. Время выдержки в пресс-форме колеблется от 6 до 90 мин в зависимости от размеров коллектора. Пластмассовый корпус прессуют в пресс-форме, нагретой до 130–140 (для пластмассы АГ-4) или до 170–180 °С (для пластмассы У5-301-41). До этой же температуры должны быть разогреты пакет коллектора и армировочные кольца, помещенные в рабочую камеру

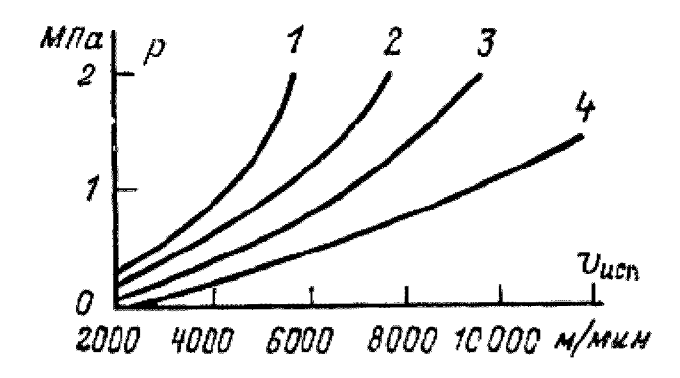


Рис. 152. Минимальное значение давления между пластинами, необходимое для удержания изоляционной прокладки: 1–4 — радиус инерции пластины R соответственно 250, 150, 100, 50 мм

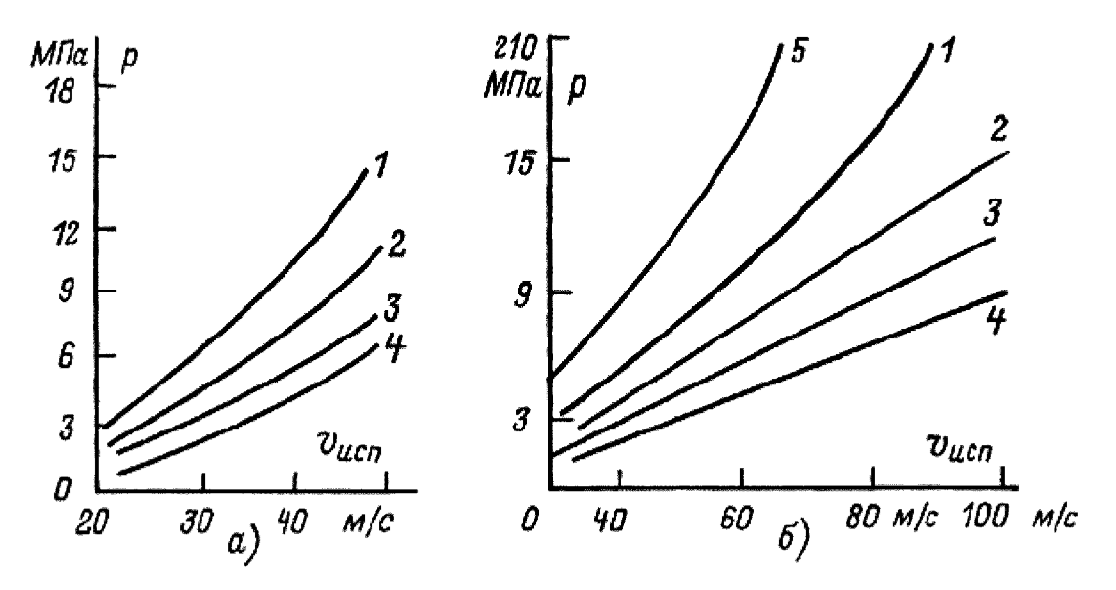


Рис. 153. Падение давления при вращении коллекторов, в которых применены пластмассы: а — У5-301-41; б — АГ-4; 1–5 — коэффициенты заполнения коллектора медью соответственно 0,85; 0,80; 0,75; 0,70; 0,90

пресс-формы. Температура втулки коллектора должна быть на 10 °С выше, чем пресс-формы. Желателен предварительный подогрев загружаемых таблеток из пресс-массы примерно до 70 °С для придания им пластичности и удаления летучих компонентов. После помещения в загрузочную камеру навеску пластмассы продавливают пуансоном в рабочую камеру. Давление при прессовании составляет 30–35 МПа для пластмассы У5-30-41 и 45–50 МПа для пластмассы АГ-4. Время выдержки под давлением около 1,5 мин на 1 мм толщи-

ны. Опрессованный коллектор термообрабатывают для повышения электрических и механических параметров пластмассового корпуса. Температура термообработки 170–200 для пластмассы У5-301-4 и 140–150 °С для пластмассы АГ-4. Время термообработки устанавливают опытным путем (по стабилизации сопротивления пластмассовой изоляции). Затем удаляют облой и лакируют места зачистки изоляционным лаком с последующим запеканием.

5.2.6. Наложение стекловолокнистых бандажей

Для крепления вращающихся обмоток обычно применялись стальные проволочные бандажи, и под них подкладывали механически прочную изоляцию, выступающую за бандаж. В последнее время широко используют бандажи из стеклянного волокна, пропитанного термореактивными связующими. Применение стекловолокнистых бандажей снижает трудоемкость бандажирования и повышает надежность машин. Ленты из однонаправленного стеклянного волокна накладывают на якоря и роторы с натяжением, которое должно быть больше, чем напряжение центробежных сил, возникающее при вращении якоря или ротора. При этом следует учесть, что при запекании бандажа натяжение снижается примерно на 40 %. Рекомендуется перед наложением стекловолокнистого бандажа нагреть якорь или ротор до 100 °С, при этом размягчается связующее бандажа и его избыток вытекает на поверхность ленты. При наложении бандажа на холодный якорь остаточное натяжение в нем при запекании снижается на 8–10 % больше, чем при бандажировании нагретого якоря. Натяжение стекловолокнистого бандажа производят на таком же оборудовании, как при использовании стальной проволоки, но применяют другое натяжное приспособление, включающее натяжные шкивы, ролики и укладчики ленты. Скорость бандажирования стекловолокнистым бандажом в несколько раз выше, чем стальной проволокой. Необходимо иметь индикатор, фиксирующий значение натяжения, и счетчик количества витков. При бандажировании стекловолокнистого бандажа толщиной более 1,6 мм по его краям устанавливают алюминиевые хомуты, препятствующие сдвигу нижних слоев верхними и снимаемые при запекании. Для заделки бандажа при большом количестве витков последний виток прижимают к бандажу, освобождают от натяжения и отрезают так,

чтобы обеспечить удерживание конца ленты на бандаже трением или адгезионной силой смолы. При небольшом количестве витков последний виток нагревают, и он скрепляется с нижележащим слоем бандажа адгезией. Окончательное запекание бандажа происходит в процессе сушильно-пропиточных операций, которым подвергают якоря и роторы.

5.2.7. Изолирование магнитопроводов

Для уменьшения потерь от токов Фуко поверхность листов электротехнической стали магнитопроводов изолируют. Первым способом изолирования была склейка листов специальной тонкой «динамной» бумагой; сейчас этот способ практически не применяют. Наиболее распространенный и простой способ изолирования листов стали — нанесение на их поверхность специальных электроизоляционных лаков. При этом двусторонняя толщина лаковой пленки получается около 15 мкм (при однократном лакировании) и 30 мкм (при двух- и трехкратном лакировании). Нанесение лака и его сушку выполняют при помощи специальных машин, причем в зависимости от способа и температуры обогрева применяют либо масляный (КФ-965), либо бакелитовый лаки, пленки которых эластичны, достаточно тверды и нагревостойки. Масляные лаки наносят на машинах с огневой сушкой. При этом в первой зоне печи температура должна быть 500–600, во второй 350–400 °С (нижние пределы температур указаны для заготовок малых размеров). Обычно скорость прохождения пластин через валки и сушильные камеры машины составляет 12±2 м/мин, длина машины должна быть такой, чтобы лак запекался не менее 0,5 мин. При лакировании пластин бакелитовым лаком нагрев осуществляется инфракрасным излучением. При этом температура на пластинах 150±10 °С. Скорость прохождения пластин, покрытых бакелитовым лаком, при таком режиме может быть увеличена до 36 м/мин. Время сушки не менее 0,2 мин.

5.3. Технология пропитки и сушки

Задача пропитки — заполнение пустот обмотки пропиточным составом с целью повышения влаго- и нагревостойкости, теплопроводности, механических и электрических параметров изоляции

обмотки. В зависимости от условий работы обмотки (высокое или низкое напряжение, повышенные или нормальные механические воздействия, повышенная или нормальная влажность окружающей среды) выбирают определенную конструкцию изоляции и соответствующие пропиточные составы и способы пропитки и сушки. Однако во всех случаях технология пропитки и сушки должна быть такой, чтобы можно было ввести оптимальное количество состава в изоляцию обмотки при пропитке и сохранить его в процессе сушки после пропитки. Схематически процесс заполнения обмотки пропиточным составом разделяется на три этапа: сушка до пропитки, пропитка и сушка после пропитки. В зависимости от изоляции и пропиточного состава может быть исключена операция сушки или до пропитки или после нее. Ранее существовали две основные технологии пропитки и сушки: для обмоток низкого напряжения — пропитка погружением в лак, для обмоток высокого напряжения — пропитка под вакуумом и давлением в компаунде. Новые конструкции изоляции и пропиточные составы, необходимость интенсификации процессов пропитки и сушки массовых машин низкого напряжения привели к широкому внедрению новых способов пропитки и сушки — струйному при повышенной температуре сушки и под вакуумом и давлением (обычно на автоматических установках типа АВБ). Однако изоляцию крупных машин мелкосерийного производства до сих пор пропитывают методом погружения в лаки. Поэтому в описании методов сушки и пропитки по этапам сохранена схема традиционной пропитки наряду с описанием новых методов. Обмотки и изоляционные материалы, длительно хранимые в помещении при нормальной влажности (относительная влажность до 70 %), содержат в порах и капиллярах влагу, которая, оставаясь в них, может снизить электрическую прочность изоляции и препятствует достаточно глубокому проникновению пропитывающего состава. Повышение влажности воздуха до 80–90 % вызывает поглощение влаги изоляцией, особенно непропитанной, и резкое снижение ее электрической прочности (рис. 154), поэтому перед пропиткой из обмотки следует удалить влагу. Обмотки с кремнийорганической изоляцией на нетермореактивных лаках (гибкие стекломиканиты, стекломикаленты) также следует до пропитки подвергать сушке, в противном случае клеящие лаки в материалах могут при

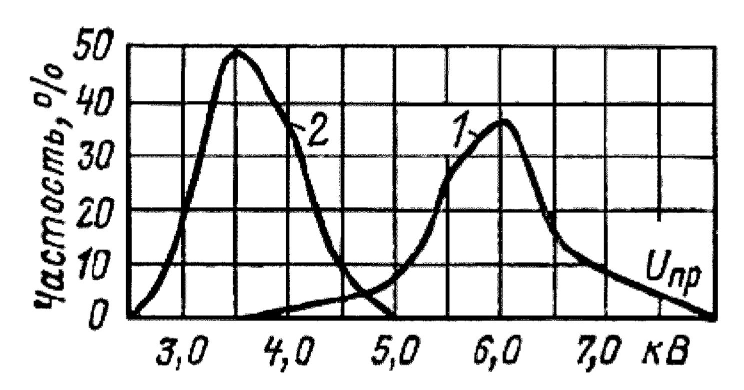


Рис. 154. Пробивное напряжение $U_{пр}$ непропитанной пазовой изоляции (миканит гибкий ГФЧО толщиной 0,2 мм между двумя слоями электрокартона толщиной 0,2 мм, провод ПЭВ-2 диаметром 1,25): 1 — до увлажнения; 2 — после 20 сут пребывания в атмосфере 95–98-процентной относительной влажности при 20±5 °С

пропитке раствориться. Сушка перед пропиткой необходима и для обмоток с непрерывной изоляцией, подвергающихся компаундированию. Для достижения монолитности необходимо наиболее глубокое проникновение компаунда в изоляцию, для чего пропитка производится под давлением, т. к. компаунд проникает в обмотку до тех пор, пока не уравняются внешнее давление на него и давление внутри обмотки. Для глубокого проникновения компаунда в обмотку необходимо не только тщательно просушить изоляцию для удаления влаги и летучих, но и создать в обмотке перед пропиткой глубокий вакуум. Нужно отметить, что сушка перед пропиткой погружением желательна еще и потому, что при пропитке нагретых обмоток происходит более быстрое и глубокое проникновение пропитывающего состава вследствие разрежения воздуха в капиллярах, возникающего при нагревании обмоток.

При пропитке обмоток водоэмульсионными лаками сушку до пропитки не производят, т. к. влага, имеющаяся в обмотках, не ухудшает качество лака, растворителем которого является вода, а при правильно выбрано режиме сушки после пропитки она удаляется из изоляции обмотки. Для некоторых изоляционных материалов при соответствующем подборе пропитывающих составов и режима сушки процесс предварительной сушки обмоток может быть исключен, однако в этом случае надо проверить, достаточно ли время сушки после пропитки. В ряде случаев время сушки после первой

пропитки нетермореактивными лаками приходится несколько увеличивать. Конечные значения сопротивления изоляции при сушке после первой пропитки обмоток, просушенных и непросушенных до пропитки, одинаковы, но для некоторых конструкций обмоток значения сопротивления изоляции с сушкой до пропитки стабилизируются скорее, чем изоляции без предварительной сушки. В первые часы сушки после первой пропитки сопротивление изоляции снижается резче для изоляции без предварительной сушки, очевидно, за счет наличия в ней влаги, которая, в дальнейшем испаряется. При второй и последующих пропитках «кривые сушки» для обмоток, подвергнутых предварительной сушке и не подвергнутых, одинаковы. Как показали опыты, изоляция обмоток с предварительной сушкой и без нее после пропиток имеет одинаковые влагостойкость и насыщенность лаковой основой, если судить по одинаковым нагревам этих обмоток. В этом случае, если для пропитки применяются сравнительно вязкие составы, для лучшего их проникновения в глубь обмоток желателен предварительный подогрев последних перед пропиткой. Подогрев также желателен для обмоток с эмалированными проводами с целью снятия внутренних напряжений, возникающих в эмалевой изоляции при деформации во время намотки, что увеличивает стойкость этой изоляции к воздействию температур и растворителей пропитывающих лаков. Для каждого типа обмоток время сушки до пропитки при выбранной температуре устанавливают опытным путем — получением «кривых сушки», определяющих время, в течение которого достигается стабилизация значений сопротивления изоляции (рис. 155). В некоторых случаях, например для пазовой изоляции из влагостойких пленок (полиэтилентерефталатной, полиимидной), «кривые сушки» не оценивают динамику сушки. Критерием времени сушки в данном случае является высыхание витковой изоляции. Чтобы определить это время, изготовляют обмотку с двумя параллельными ветвями для замера сопротивления между ними или извлекают обмотку из паза для визуальной проверки степени высыхания. Чем выше температура, тем быстрее происходит удаление летучих и влаги из обмотки. По данным, при увеличении температуры предварительной сушки от 110–120 до 130–140 °С ее продолжительность может быть сокращена вдвое. Однако температура сушки для каждого типа (класса) изоля-

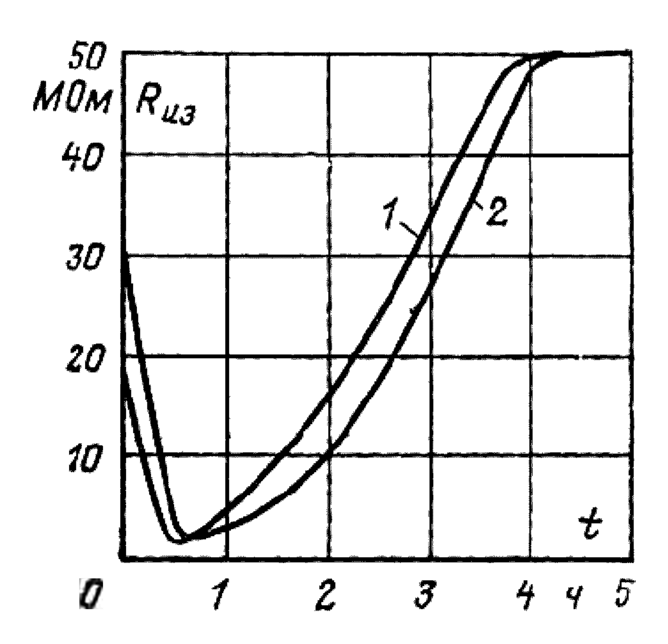


Рис. 155. Зависимость сопротивления изоляции обмоток статоров асинхронных двигателей $R_{из}$ от времени сушки до пропитки t (при 120±5 °С): 1 — двигатель А-91-6; 2 — двигатель А-92-4

ции должна быть ограничена в зависимости от ее нагревостойкости во избежание ускоренного старения. Длительность режима сушки зависит от химического состава и физических свойств изоляционных материалов; конструкции изоляции обмотки, в частности, соотношения поверхности изоляции и ее объема; степени увлажнения изоляции; температуры сушильной печи, скорости циркуляции воздуха и степени обмена воздуха в печи; времени разогрева обмоток, которое в свою очередь зависит от их массы и теплоемкости, а также от температуры печи; тепловой мощности сушильной печи. Время сушки также зависит и от расположения деталей в сушильной печи, которые следует размещать так, чтобы их интенсивно омывал горячий воздух. При вакуумной сушке рекомендуется чередовать вакуум с атмосферным давлением. Первоначально обмотки при атмосферном давлении подогревают до заданной температуры сушки, затем их подвергают вакуумированию. При вакуумировании происходит очень интенсивное удаление влаги, приводящее к снижению температуры обмоток, поэтому в первые часы, когда особенно интенсивно удаляется влага, следует периодически прогревать обмотку при атмосферном давлении. Количество пропиток, которым подверга-

ются обмотки электрических машин, зависит от конструкции обмоток и их изоляции, типа примененных изоляционных материалов, лаков и компаундов, способов пропитки и условий работы машины. При применении лаков с растворителями производится одна, две пропитки и более, а при использовании компаундов для ряда конструкций достаточно однократной пропитки. Основным способом пропитки ранее являлось погружение. Перед погружением обмотку обычно нагревали до 60–70 °С, т. к. при более высокой температуре быстро улетучивается растворитель, что может привести к ускоренной коагуляции лака. При пропитке погружением проникновение лака в обмотку происходит под действием силы гидростатического давления. При пропитке без предварительного нагрева и сушки требуется более длительное время выдержки обмоток в лаке, но общая продолжительность процесса пропитки и сушки снижается за счет отмены предварительной сушки. Количество пропиток в большой степени зависит от примененных изоляционных материалов. Для изоляции классов нагревостойкости B, F и H, состоящей из проклеенных лаками слюдяных и стекловолокнистых материалов, фактически требуется меньшее заполнение лаковой основой, чем для изоляции класса A, состоящей из целлюлозных волокон. При пропитке погружением оптимальное количество пропиток в значительной мере зависит от конструкции обмоток, в частности, от коэффициента заполнения паза. Чем выше этот коэффициент (что в первую очередь относится к шаблонным обмоткам с корпусной изоляцией и роторным стержням), тем меньшее количество пропиток требуется для достижения оптимального заполнения паза лаковой основой. При многократных пропитках заполнение пор и пустот в изоляции обмоток происходит в основном при первой пропитке, а последующие являются покрывными. Сопротивление изоляции обмоток по мере увеличения количества пропиток снижается, т. к. лаковая пленка имеет более низкое сопротивление, чем вытесненный ею воздух, однако качество изоляции обмоток и в первую очередь влагостойкость растут (рис. 156). Время выдержки обмоток в лаке при пропитке зависит как от конструкции и состава ее изоляции, так и от пропитывающего лака и способа пропитки.

При первой пропитке методом погружения предварительно нагретых обмоток длительность процесса колеблется от 15 до 30 мин,

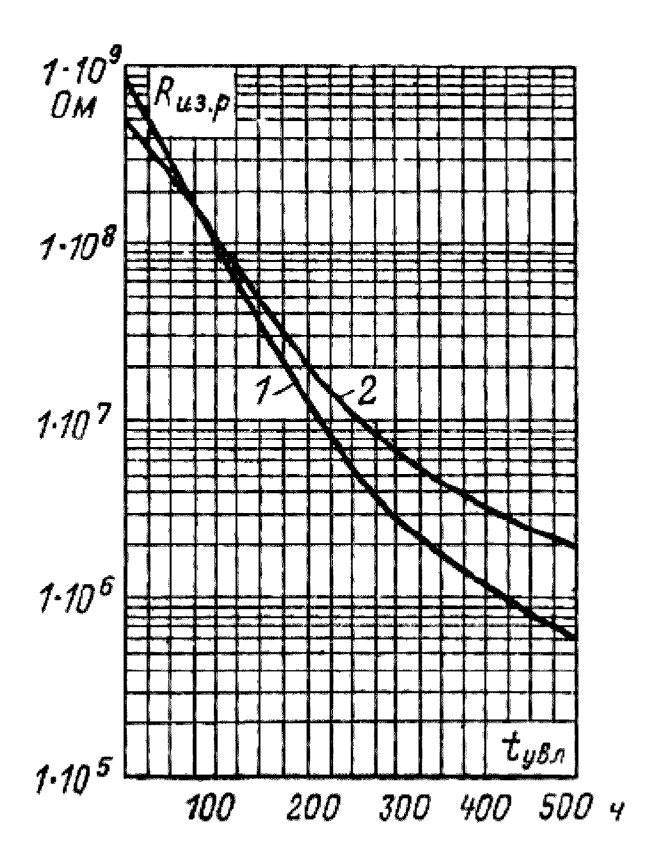


Рис. 156. Зависимость сопротивления изоляции обмоток роторов $R_{из.р}$ электродвигателей от времени пребывания в атмосфере 95–98-процентной относительной влажности $t_{увл}$ при 20–25 °С: 1 — ротор пропитан 1 раз лаком БТ-987; 2 — ротор пропитан 2 раза лаком БТ-987

а при холодных обмотках — от 25 мин до 1 ч, при последующих пропитках время выдержки в лаках сокращается. Для пропитки обмоток низкого напряжения (всыпных, полукатушечных) при вакууме и давлении достаточно 5–7 мин. Для лучшего проникновения лака при пропитке погружением и быстрейшего вытеснения воздуха узлы электрических машин следует устанавливать так, чтобы пазы были в вертикальном или наклонном (до 30° к вертикали) положении. При вакуумировании происходит удаление влаги и воздуха из пор и капилляров, что облегчает проникновение пропитывающего лака в обмотку. Если на лак, засосанный в обмотку под вакуумом, воздействовать повышенным давлением, то пропитка произойдет еще быстрее и глубже. Пропитка при вакууме и давлении особенно эффективна в случае так называемого «тренировочного процесса», при котором попеременно чередуются вакуум и давление (до 5 раз).

Применение вакуума и давления не только улучшает качество пропитки, но позволяет значительно сократить количество пропиток, если используют лаки, высыхающие в толстом слое. Для проникновения лака в обмотку при ее погружении он должен обладать невысокой вязкостью (обычно не выше 30–40 с по вискозиметру), поэтому применяют лаки с малым содержанием пленкообразующих, например 35–45 % у лака МЛ-92 и 50–55 % у лака КО-916к. Для хорошего заполнения обмоток пропитки обычно производят 2 раза и более. Если удается в обмотку ввести лак с большим содержанием пленкообразующих (60 %) и соответственно с вязкостью 50–100 с по визкозиметру, то можно ограничиться меньшим количеством пропиток. Автоматизация пропитки и сушки обеспечивает постоянство выбранных режимов и возможность быстрого их изменения. Возможность регулировать в широком диапазоне температуру сушки до пропитки позволяет также оптимально насытить обмотку лаком и обеспечит минимальное его вытекание после пропитки (что также достигается выбором режима вакуумирования после слива лака из пропиточного котла и температуры сушки после пропитки в первой зоне сушки, чтобы лак минимально разжижался и не вытекал). В настоящее время накоплен большой опыт пропитки на таких установках статоров и роторов лаками МЛ-92 и ПЭ-933, но возможно и применение других лаков, например КО-916к. Из лаков для пропитки на установках АВБ к моменту желатинизации должно уделяться максимальное количество растворителя (90 % и более). Пропитываемые узлы помещают на подвесы конвейера, движение которого прерывистое с автоматическим тактом в зависимости от выбранных режимов. Узлы поступают в камеру предварительной сушки, температура которой выбрана таким образом, чтобы обеспечить необходимую сушку или подогрев обмоток и оптимальное заполнение их пропиточным лаком, затем подают в зону остывания, в пропиточный автоклав, в зону стекания лака и в зону сушки после пропитки. Все операции (табл. 92) производятся автоматически.

Время и температура сушки после пропитки зависят от пропитываемого изделия и пропиточного состава, например, статоры с высотой центров 200 мм при пропитке лаком ПЭ-933 сушат 4 ч (из них первый час при температуре не выше 130 °С, а следующие 3 ч при 150–160 °С), а при пропитке лаком МЛ-92 при 145±5 °С 3–4 ч.

Таблица 92

Пропитка узлов лаками

Операция	Время, с
Поступление изделия в автоклав	15–40
Закрывание автоклава	15–40
Создание вакуума (остаточное давление 67–5,3 кПа)	20–40
Всасывание пропиточного лака	60–100
Создание давления 200 кПа	10–15
Вакуумирование при остаточном давлении 67 кПа	60–100
Создание давления около 200 кПа	30–90
Слив лака из автоклава	30–60
Перекрытие крана лакопровода	5–10
Создание вакуума с остаточным давлением 5,3 кПа	10–15
Стекание лака и остывание под вакуумом	90–120
Уравнение давления в автоклаве с атмосферным	20–40
Открывание автоклава	10–20

Заполнение обмоток этими лаками за одну пропитку на установке АВБ не меньше, чем при двукратной пропитке методом погружения. В связи с глубоким проникновением лака в изоляцию в узлах необходимо применять выводные провода и гибкие трубки, не приобретающие хрупкости после пропитки и сушки. Нельзя использовать поливинилхлоридные трубки марки ТВ, линоксиновые марки ТЛВ, все стеклолакочулки, провода с поливинилхлоридной изоляцией, провода ПРГ, ЛПРГС, ПВШО, а также провода РКГМ и ПТЛ-200. Можно применять провода ПВПО, ПРГБ, ПАЛ-130 и ПАЛ-180, ПВКФ, трубки марок ТКР и ТРФ. Для снятия запеченного лака с наконечников перед установкой узлов на пропиточный конвейер следует окунуть наконечники в антиадгезионную смазку, состоящую из 100 мас. ч. полиэфируретанового каучука, 50 мас. ч. лака ГФ-957, 50 мас. ч. толуола.

Для электрических машин крупносерийного производства с высотой центров до 200 мм в последнее время широко применяют термореактивные составы без растворителя, вводимые в обмотку с помощью так называемого «струйного метода».

Время на технологический процесс при использовании современных термореактивных составов без растворителей определяет-

ся продолжительностью нагревания обмотки до заданной температуры, а также скоростью полимеризации состава, который, как правило, быстро полимеризуется. Применяют индукционный или токовый методы нагревания обмоток, совмещение процессов прописки и полимеризации и т. п., что резко сокращает длительность и трудоемкость процессов, а также потребность в производственных площадях. В автоматических установках различного типа для пропитки составами без растворителей пропитка и сушка выполняются за 15–18 мин. Струйный метод основан на подаче тонкой струей автоматически дозируемого количества компаунда из одного или нескольких сопл на нагретую лобовую часть обмотки узла, установленного под углом до 30° к горизонтали и вращающегося с частотой несколько минут в минус первой степени (рис. 157). Компаунд благодаря малой вязкости при повышенной температуре проникает в обмотку и полностью ее пропитывает. Медленное вращение узлов предохраняет от вытекания из обмоток компаунда, который, проникнув до нижней лобовой части, переходит в необратимое твердое состояние. Внутренние и наружные поверхности

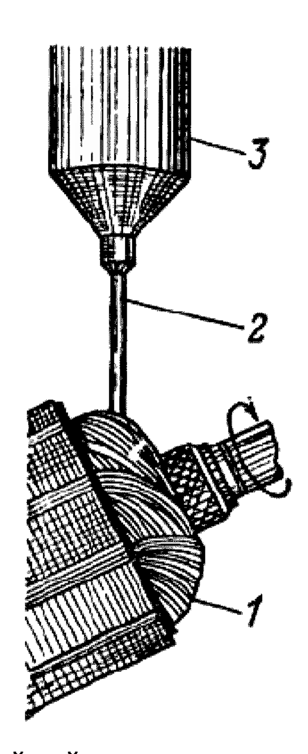


Рис. 157. Схема струйной пропитки малогабаритного якоря:
1 — обмотка якоря; 2 — струя компаунда; 3 — сопло

пакетов магнитопроводов, а также коллекторы и валы при этом не загрязняются. Якоря и статоры закрепляют в специальных приспособлениях. Для нагрева обмотки подключают напряжение быстродействующими зажимными устройствами. Применяют нагрев токовый и инфракрасными лучами или комбинацию обоих методов. Вращение пропитываемой обмотки продолжают до затвердевания компаунда. Автоматические многопозиционные установки роторного типа фирмы «Микафил» (Швейцария), предназначенные для струйной пропитки обмоток якорей диаметром до 60 мм, имеют производительность до 240 шт./ч и занимают площадь менее 1 $м^2$. Японские фирмы выпускают установки производительностью до 480, американские — до 800 шт./ч. На установках фирмы «Микафил» осуществляется пропитка статоров массой до 30 кг. Установка для пропитки статоров наружным диаметром до 400 мм занимает площадь около 1 $м^2$, ее масса 550 кг, потребляемая мощность 2 кВт. Производительность установки для пропитки статоров наружным диаметром 200 мм — 90 шт./ч. Обслуживание установок сводится к загрузке и выгрузке изделий и добавлению компаунда. Для равномерного распределения пропиточного состава в обмотке крупногабаритных статоров применяют автоматический трехтактный метод струйной пропитки. При этом общее количество состава, расходуемого на узел, заранее распределено как по отдельным тактам, так и по катушечным группам в обмотке. Обычно в первом такте (рис. 158) расходуется 40–60 % дозируемого для данной обмотки состава, во втором — 30–50 и в третьем — около 10 %. Переналадка уста-

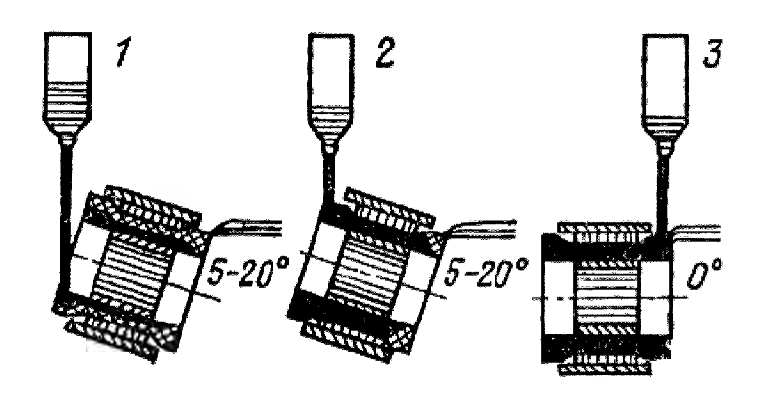


Рис. 158. Схема трехтактной пропитки крупных статоров струйным методом: 1–3 — порядок тактов

новки, регулирование нагрева, продолжительности такта и количества дозируемого состава занимают около 0,5 ч. Реже применяется способ пропитки лаками с растворителями, при котором время сушки и пропитки составляет 1–2 ч. По методу Зондероля обмотку до пропитки нагревают до температуры, на 10–20 °С превышающей температуру кипения растворителей. По мере проникновения лака в подогретые обмотки большая часть растворителя испаряется, и после пропитки обмотка практически его уже не содержит. Чем ниже температура при пропитке, тем больше падает сопротивление изоляции в процессе пропитки и медленнее возрастает в процессе сушки (рис. 159). Ход кривой сопротивления в большей степени зависит от свойств растворителя лака. При сушке после пропитки в основном происходит запекание лаковой пленки, т. к. лак уже почти не содержит растворителя. Метод Зондероля не может быть рекомендован для пропитки лобовой изоляции обмоток. Необходимо, чтобы эмалированные провода были стойки, как к воздействию растворителей, так и к тепловому удару. Процесс пропитки по методу Зондероля идет примерно таким образом: изоляцию нагревают до 160 °С и выдерживают при этой температуре 0,5–1 ч, затем детали погружают в лак на 10–20 с и, вынув из лака, помещают в сушильную печь, нагретую до 160 °С. При данном методе время сушки после пропитки сокращается с 10–15 до 1–2 ч (рис. 160). Некоторые предприятия пытаются интенсифицировать пропитку об-

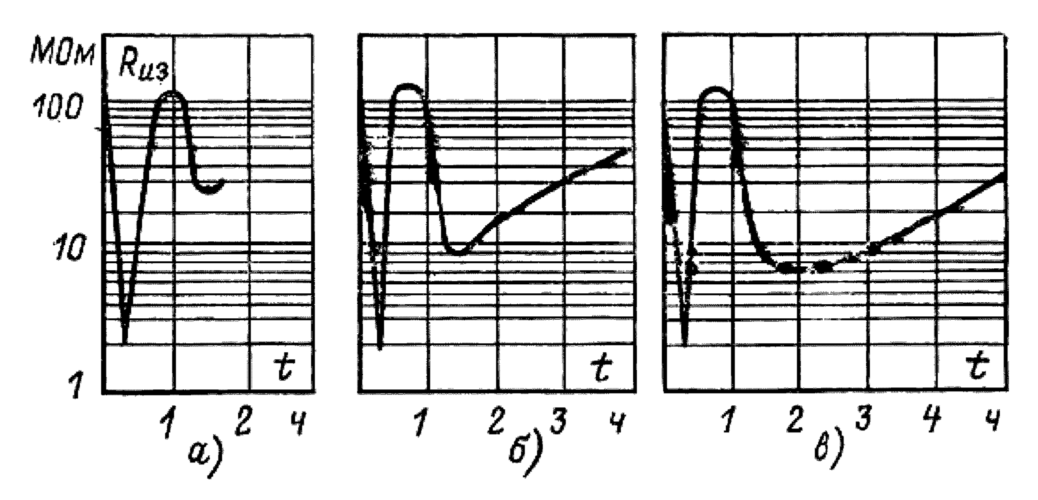


Рис. 159. Изменение сопротивления изоляции $R_{из}$ во время однократной пропитки по методу Зондероля и сушки: а — при 160 °С; б — при 150 °С; в — при 140 °С

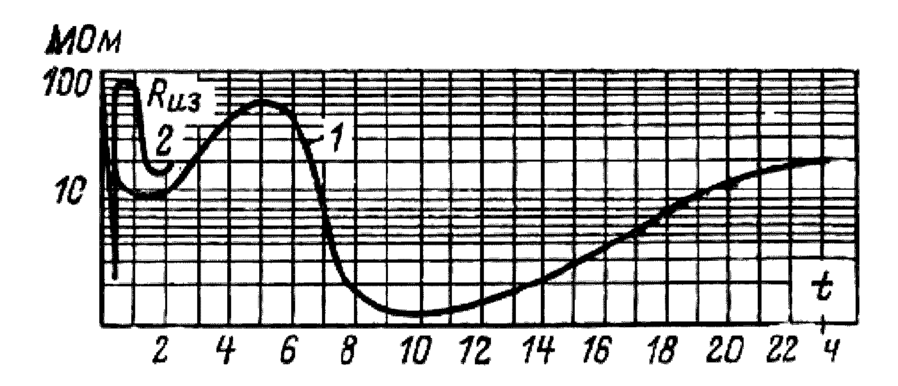


Рис. 160. Изменение сопротивл ения изоляции $R_{из}$ во время сушки после однократной пропитки: 1 — пропитка погружением; 2 — пропитка по методу Зондероля (сушка при 160 °С)

моток подачей на лак ультразвуковых колебаний. Эффективность применения ультразвуковых колебаний для пропитки узлов исследовалась на макетах пазов с обмоткой из провода ПЭТВ. Колебания осуществляли с помощью жидкостного свистка СЖ-1 или генератора ЛГЗ-10а с частотой 21,5 кГц. Пропитку выполняли лаком МЛ-92 с различным содержанием пленкообразующих. Лак сильно разогревался, его вязкость повышалась за 10 мин вдвое, за 20 мин воздействия на лак ультразвуковых колебаний его температура возрастала до 75 °С, и в дальнейшем он коагулировал. Сравнительные испытания показали, что при воздействии ультразвуковых колебаний, как и при пропитке погружением, получаются одинаковые насыщение массой лака и повышение пробивного напряжения витковой изоляции. Пропитка с помощью ультразвука, требуя относительно сложного оборудования, не дает качественного эффекта и практически не сокращает цикл пропитки и сушки, который в основном определяется длительностью сушки после пропитки.

К тому же при увеличении частоты колебаний может повредиться изоляция эмалированных проводов. Время сушки лаков после пропитки погружением зависит от ряда факторов: конструкции и материала пропитанных обмоток и габаритов изделия, свойств пропиточного состава и содержания в нем пленкообразующих, применяемых растворителей, температуры сушки и циркуляции воздуха в сушильной установке, тепловой мощности печи. Обмотки и узлы устанавливают в сушильную печь таким образом, чтобы они

лучше омывались горячим воздухом. Процесс сушки по существу разделяется на две стадии: разогрева обмоток при одновременном удалении растворителей и запекания лаковых пленок. Подъем температуры выше 130 °С нежелателен, т. к. при этом может произойти частичное запекание лаковой пленки при неполном испарении растворителя, что обычно приводит к ее прочности и затрудняет удаление остатков растворителя. Хотя интенсивный воздухообмен и ускоряет процесс удаления растворителей из обмоток, но в каждом конкретном случае в зависимости от конструкции, состава изоляции обмоток, пропиточных лаков и растворителей скорость обмена воздуха должна быть выбрана индивидуально. Хороший эффект в первый период сушки дает вакуумная сушка, т. к. удаление растворителей ускоряется, но лаковая пленка при этом не запекается. Время, требуемое для запекания лаковой пленки, в первую очередь зависит от температуры сушки: чем она выше, тем быстрее запекается пленка. При повышении температуры сушки узлов, пропитанных лаком БТ-988, от 110–120 до 130–140 °С время сушки сокращается в среднем на 25 % (особенно после первой пропитки, когда обмотка насыщается наибольшим количеством лака), а при повышении температуры сушки после пропитки лаком МЛ-92 на установке АВБ-32 от 130–145 °С время сушки уменьшается на 40–50 %. При выборе температуры и времени сушки следует учитывать нагревостойкость изоляции обмотки. Кратковременное (в течение 10–30 мин) повышение температуры сушки обмоток с изоляцией класса А до 170–180 °С вполне допустимо. Обмотки, пропитанные составами, не содержащими растворителей и не выделяющими побочных продуктов при отверждении, можно подвергать индукционной или токовой сушке, при доведении температуры до 180–190 °С и сокращении времени до 5–20 мин. Сушка под вакуумом целесообразна только в начальный период, т. к. большинство лаков высыхает в результате оксидационных процессов, происходящих в лаковых пленках, и для ускорения процессов сушки необходима циркуляция воздуха. Как правило, время сушки для вращающихся обмоток по сравнению с неподвижными должно быть увеличено на 25–50 %. Для обмоток машин тропического исполнения по сравнению с обмотками машин исполнения У время сушки рекомендуется увеличить на 15–25 %, т. к. недостаточно просушенный лак

не только снижает влагостойкость изоляции, но в тропических условиях вызываете усиленное заплесневение. Если учитывать, что при первой пропитке окунанием происходит самое большое насыщение обмотки лаком, время сушки после первой пропитки нетермореактивными лаками должно быть наибольшим. При двукратной пропитке следует рекомендовать одинаковое время сушки после первой и второй пропиток. При многократных пропитках наибольшее время сушки должно быть после первой и последней пропиток. При пропитке термореактивными лаками время сушки должно быть минимальным после первой и максимальным после окончательной пропиток. После каждой из пропиток окунанием перед сушкой желательно производить консервацию выводных концов с целью сохранения их гибкости, которая снижается из-за температурного старения при сушке. Консервация обычно состоит из снятия растворителем натеков лака с поверхности выводного кабеля и промазки ее касторовым или вазелиновым маслом или кремнийорганическим вазелином. (Промазка касторовым маслом неэффективна, если температура сушки превышает 170 °С). Рекомендации по применению пропиточных лаков и числу пропиток для различного типа узлов приведены в табл. 93, а по температуре и времени сушки — в табл. 94. В рекомендуемое время входит время разогрева обмотки узлов, т. к. одновременно с разогревом происходит и частичное удаление растворителя. Приведенные в табл. 94 температуры — это температуры запечки лака, а удаление растворителя из обмотки автоматически происходит при разогреве (при более низких температурах). Для лаков, у которых удаление растворителя и запечка пленки происходят при резко отличающихся температурах (100–120 и 180–190 °С), указано время двух стадий сушки. Для сокращения времени, необходимого для разогрева обмоток и узлов, их загружают в нагретые до оптимальной температуры сушильные печи. Минимальное время указано для узлов меньших габаритов, максимальное — наибольших; минимальное время дано для сушки при максимальных температурах, максимальное — при минимальных.

Таблица 93

Рекомендуемые лаки и число пропиток

Обмотка и ступень технологии	Класс изоляции	Пропитываемый провод или материал для корпусной изоляции	Способ пропитки	Исполнение изоляции					
				У			Т		
				Лак	Пленкообразующие, %	Количество пропиток	Лак	Пленкообразующие, %	Количество пропиток
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Всыпные обмотки статоров, якорей и роторов; пропитка в узле	A	ПБД, ПЭЛБО, ПЭЛШО	Горячее погружение	БТ-987	30–38	2	–	–	–
	A, E, B	ПЭВ, ПЭТВ, ПЭВТ Л, ПСД	То же АВБ Струйный	МЛ-92 МЛ-92 КП-34, КП-103	35–45 52–60 –	2 1 1	МЛ-92 МЛ-92 –	35–45 52–60 –	3 2 –
	F	ПСД, ПСДК	Горячее погружение АВБ Струйный	ПЭ-933 ПЭ-933 КП-34, КП-103	50–55 52–60 –	2 1 1	ПЭ-933 ПЭ-933 –	50–55 52–60 –	3 2 –
	F	ПЭТ-155, ПЭФ-155	Горячее погружение	КО-964Н	55–60	2	КО-964Н	50–60	3
	F, H	ПСДК	Горячее погружение	КО-964Н КО-916к	55–60 55–66	2 2	КО-964Н КО-916к	55–60 55–66	3 3
Шаблонные обмотки якорей, роторов и статоров; пропитка витковой изоляции	A	ПБД	Горячее погружение	БТ-987, БТ-988	28–35	1	–	–	–
	B	ПСД, ПЭТВП	Горячее погружение	МЛ-92	35–45	1	МЛ-92	35–41	1
	F	ПСД, ПЭТП-155	Горячее погружение	ПЭ-933 КО-916к	40–50 45–55	1 1	ПЭ-933 КО-916к	40–50 45–55	1 1
	H	ПСДК	Горячее погружение	КО-964Н	45–55	1	КО-964Н	45–55	0

Таблица 93 (продолжение)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Шаблонные обмотки статоров и якорей с корпусной изоляцией; пропитка корпусной изоляции	B	Микалента ЛМС-ББ Гибкий миканит ГФС-ТТ	Горячее погружение Горячее погружение	МЛ-92 ФЛ-98	35–40 45–50	1 1	МЛ-92 ФЛ-98	35–40 45–50	1 1
	F	Микалента ЛФС-ТТ, ЛФЭ-ТТ ; Гибкий миканит ГФС-ТТ		ПЭ-933	45–50	1	ПЭ-933	45–50	1
	H	Микалента ЛФК-ТТ, гибкий миканит ГФК-ТТ		КО-916к	45–50	1	КО-916к	45–50	1
Шаблонные обмотки статоров, пропитка в статорах(корпусная и витковая изоляция предварительно пропитана)	B	ЛМЧ-ББ, ГФЧО, ЛМС-ББ, ЛМС-ТТ, ГФС-ТТ	Горячее погружение	БТ-987 МЛ-92 ФЛ-98	30–38 35–45 50–55	1 1 1	БТ-987 МЛ-92 ФЛ-98	30–38 35–45 50–55	2 2 2
	F	ЛФК-ТТ , ЛФЭ-ТТ, ГФС-ТТ		ПЭ-933	50–55	1	ПЭ-933	50–55	2
	H	ЛФК-ТТ, ГФК-ТТ		КО-916к	55–60	1	КО-916к	55–60	2
Шаблонные обмотки статоров (полукатушечные с изолировкой паза); пропитка обмоток в статорахи роторах	A	ПБД	Горячее погружение	БТ-987 БТ-988	28–35 28–35	1 1	– –	– –	– –
	B	ПСД, ПЭТВП	Горячее погружение АВБ	МЛ-92 МЛ-92	35–45 51–60	1 1	МЛ-92 МЛ-92	35-45 51–60	2 1
	F	ПСД ПЭТП-155	АВБ Горячее погружение	ПЭ-933 ПЭ-933 КО-964Н	52–65 50–55 50–60	1 1 1	ПЭ-933 ПЭ-933 КО-964Н	52–65 50–55 50–60	1 2 2
	H	ПСДК		КО-916к	55–66	1	КО-916к	55–66	2

Таблица 93 (окончание)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Стержневые обмотки роторов, шаблонные обмотки якорей; пропитка в якорях (корпусная и витковая изоляция предварительно пропитаны); пропитка в роторах	B	ЛМЧ-ББ, ГФЧ-ББ Микафолий МФГ-Б, слюдопластофолий ИФГ-Б	Горячее погружение	МЛ-92 ФЛ-98	35–45 50–55	1 1	МЛ-92 ФЛ-98	35–42 50–55	2 2
	F	ЛМС-ББ, ЛМС-ТТ, ГФС-ТТ, микафолий МФГ-Т		ПЭ-933	50–55	1	ПЭ-933	50–55	2
	H	ЛФК-ТТ, МФК-Т		КО-916к	55–66	1	КО-916к	55–66	2
Шунтовые катушки машин постоянного тока; пропитка катушек	A	ПБД, ПЭЛБО	Под вакуумом и давлением	БТ-987, БТ-988	30–38	2	–	–	–
		ПЭВ-2		МЛ-92	45–55	1	МЛ-92	45–55	2
	B	ПСД, ПЭТВ	АВБ	МЛ-92 ФЛ-98 КП-34 КП-103	45–55 50–60 – –	1 1 1 1	МЛ-92 ФЛ-98 – –	45–55 50–60 – –	2 2 – –
	F	ПСДК	АВБ	ПЭ-933	50–60	1	ПЭ-933	50–60	2
		ПЭТ-155	Под вакуумом и давлением	КО-964Н	50–60	1	КО-964Н	50–60	2
		ПЭФ–155		КО-916к	50–60	1	КО-916к	50–60	2
	H	ПСДК		КО-916к	50-60	1	КО-916к	50–60	2

Таблица 94

Рекомендуемые режимы сушки обмоток после пропитки

Тип обмотки и ступень технологии	Класс изоляции	Способ сушки	Лак	Режим сушки после пропитки	
				Температура, °С	Время, ч
Всыпные обмотки статоров якорей и роторов. Стержневые обмотки роторов. Шаблонные обмотки роторов и статоров (полукатушечные с изолировкой паза, витковая изоляция предварительно пропитана). Шаблонные обмотки статоров (корпусная и витковая изоляция предварительно пропитаны); пропитка в узле	А	Конвекционный	БТ-987	110–125	6–15
	А, Е, В		МЛ-92	130–145	6 –15
	F	АВБ	МЛ-92	130–150	3–6
		Индукционный токовый	КП-34, КП-103	150–170	0,2–0,5
		Конвекционный	ПЭ-933, КО-964Н	110–125 и 150–160	2–3 и 6–12
		АВБ	ПЭ-933	150–160	3–5
	Н	Конвекционный	КО-964Н	110–125 и 150–160	2–3 и 6–12
			КО-916к	100–125 и 180–220	3–5 и 6–12
Шаблонные обмотки якорей статоров и роторов; пропитка витковой изоляции	А	Конвекционный	БТ-987	110–125	0,5–2,0
	А, Е, В		МЛ-92	125–135	0,5–2,0
	F		ПЭ-933, КО-964Н	110–125 и 150–160	0,5–1,0 и 1,0 –3,0
	Н		КО-916к	105–125 и 180–200	0,5–1,0 и 1,0–3,0
Шаблонные обмотки статоров, якорей с корпусной изоляцией, пропитка корпусной изоляции	А, Е, В	Конвекционный	БТ-987 МЛ-92, ФЛ-98	115–125 135–145	3–6 3–6
	F		ПЭ-933	105–125 и 150–160	1–2 и 2–5
	Н		КО-964Н, КО-916к	110–125 и 180–200	1–2 и 2–5
Шаблонные обмотки якорей (корпусная и витковая изоляция предварительно пропитаны); пропитка в якорях	А, Е, В	Конвекционный	МЛ-92, ФЛ-98	135–145	10–20
		АВБ	МЛ-92, ФЛ-98	135–145	4–8
		Индукционный токовый	КП-34, КП-103	170–190	0,3–0,5
	F	Конвекционный	ПЭ-933	110–125 и 150–160	2–3 и 8–16
	Н	Конвекционный	КО-916к	110–125 и 200–220	2–3 и 8–16

Таблица 94 (окончание)

Тип обмотки и ступень технологии	Класс изоляции	Способ сушки	Лак	Режим сушки после пропитки	
				Температура, °С	Время, ч
Шунтовые катушки машин постоянного тока, пропитка катушек	А, Е	Конвекционный	БТ-987	120–130	14–30
	А, Е, В		МЛ-92, ФЛ-98	135–145	15–25
	F	Индукционный	КП-34, КП-103, КП-23	150–170	0,2–0,6
	H	Конвекционный	ПЭ-933	110–125 и 150–160	2–3 и 10–25
			КО-916к	110–125 и 180–220	2–4 и 10–25

5.4. Компаундирование обмоток

Обмотки для электрических машин низкого напряжения подвергаются пропитке лаками, а обмотки для машин низкого и высокого напряжения, изготовленные из катушек с корпусной изоляцией, — пропитке компаундами или компаундировке битумами.

Пропитка низковольтных обмоток — это процесс заполнения обмотки и ее изолировка специальными лаками или составами с последующей запечкой. Пропитку выполняют составами без растворителей или лаками на основе растворителей с содержанием пленкообразующих веществ от 35 до 70 % в зависимости от лака и технологии пропитки.

Пропитка значительно замедляет процессы теплового старения и увлажнения электроизоляционных материалов, т. к. уменьшается площадь их соприкосновения с окружающей средой, снижается превышение температуры обмоток, поскольку теплопроводность лаков намного выше теплопроводности воздуха, повышается электрическая прочность изоляции вследствие заполнения пор и капилляров обмотки лаками, имеющими более высокую электрическую прочность, чем воздух. Цементируя витки обмоток, пропитка снижает механический износ их изоляции.

Лаки с растворителями состоят из основы (синтетических смол) и растворителей (ксилола, толуола и др.), служащих для разжижения основы лака. В состав лака добавляют также некоторое количество пластификаторов, придающих гибкость застывшей лаковой пленке, и сиккативов — веществ, ускоряющих процесс отвердевания основы лака после пропитки. При добавлении растворителей пропиточный состав разжижается и во время пропитки основа лака проникает внутрь обмотки и остается там после испарения растворителей.

Стремление повысить содержание смолы в лаке и сократить время отвердевания привело к созданию пропиточных составов без растворителей. Их выпускают двух видов: составы на основе ненасыщенных полиэфирных и на базе эпоксидных смол. Первые отличаются более низкой стоимостью и лучшими сопротивляемостью термическим ударам и совместимостью с нагревостойкими лаками.

Пропитке всегда предшествует сушка или нагрев изоляции, что необходимо для удаления влаги из обмоток, а также снятия внутренних напряжений в эмалевой изоляции проводов, которые возникли при эмалировании провода и намотке. Пропитке желательно подвергать изделия, нагретые до 60–70 °С, для лучшего проникновения лака в глубь обмотки. После пропитки изделия сушат для удаления растворителя и запекания пленкообразующих лака.

Растворители лаков (ксилол, толуол) при сушке должны испариться и выделиться из обмоток в виде летучих веществ, которые необходимо нейтрализовать или рассеять в атмосфере, поэтому участки пропитки с такими лаками, как правило, располагаются в отдельных помещениях с хорошей принудительной приточно-вытяжной вентиляцией. Составы без растворителей при отвердевании не выделяют вредных летучих веществ. Специальные установки пропитки, работающие на составах без растворителей, можно располагать в общем технологическом потоке, что очень важно и экономично в поточно-массовом производстве.

Сушку выполняют, как правило, в две ступени: на первой ступени при 120 °С удаляется растворитель, на второй ступени при температуре, соответствующей отвердеванию применяемого лака, происходит его полимеризация. Для сушки используют конвективные тупиковые или проходные печи с электрическим или паровым обогревом, терморадиационные и печи аэродинамического нагре-

ва. Сушку осуществляют также пропусканием электрического тока по обмоткам.

Компаундирование — это способ заполнения обмоток битумом для устранения пустот в изоляции и создания их полной монолитности. При этом происходит гидростатическое опрессование обмоток. Битум может проникать в изоляцию на всю ее толщину или незначительно в зависимости от принятой технологии. Отсутствие воздуха в обмотке перед внесением состава и сохранение в ней внесенного состава является обязательным.

Компаундирование происходит при высокой температуре и в глубоком вакууме. После остывания компаундированные катушки твердеют (при постукивании по ним слышится «деревянный» звук), а при повторном нагреве размягчаются и опять твердеют при остывании. Температура размягчения 125–130 °С, поэтому компаундированная изоляция обмоток имеет классы нагревостойкости А и В и используется на неподвижных частях машин.

Компаундированную изоляцию из-за ее размягчения при нагревании и отвердевания при охлаждении называют термопластичной. В последние годы в новых разработках ее не применяют и только в некоторых случаях используют при капитальном ремонте ранее изготовленных машин.

Пропитка эпоксидными компаундами — сравнительно новый технологический процесс, который имеет те же цели, что и компаундирование. Пустоты в обмотке заполняют эпоксидными компаундами при 50–80 °С и глубоком вакууме. При этом гидростатическое опрессование обмоток также обязательно. После пропитки компаунды запекают при высокой температуре.

Обмотки, пропитанные эпоксидными компаундами, называют термореактивными, поскольку они не размягчаются при повторном нагревании.

В процессе изготовления и после укладки в пазы статоров, роторов и якорей обмотки пропитываются лаками или компаундами с последующей сушкой.

В результате пропитки и сушки улучшаются следующие свойства электрической изоляции:

1) повышается нагревостойкость;

2) улучшается теплопроводность обмоток за счет уменьшения воздушных прослоек между проводниками и стенками паза сердечника;
3) повышается влагостойкость изоляции, особенно волокнистой, из-за уменьшения гигроскопичности в результате заполнения пор и создания лаковой пленки, препятствующей проникновению влаги внутрь обмотки;
4) повышается электрическая прочность изоляции, т. к. электрическая прочность пропиточных материалов выше электрической прочности воздуха, находящегося между волокнами непропитанных материалов;
5) повышается механическая прочность изоляции, т. к. пропитанная обмотка имеет хорошо сцементированные витки, плотно- и прочно сидящие в пазах сердечников. Благодаря этому предотвращается перемещение проводников в результате вибрации и связанное с этим повреждение изоляции от истирания.

Наружные поверхности обмоток после сушки окрашивают покровными эмалями и лаками. Образующаяся в результате этого твердая и гладкая пленка толщиной 50–60 мкм хорошо защищает изоляцшо от влаги, смазочных масел и скапливания пыли.

Для пропитки обмоток пользуются следующими методами:

1) погружением в лак;
2) на стендах с нижней подачей лака;
3) струйным поливом;
4) компаундированием;
5) вакуумно-нагнетательным способом.

Выбирают метод пропитки в зависимости от типа лака и конструкции обмоток.

Процесс пропитки обмоток компаундом состоит из их сушки (при атмосферном давлении и под вакуумом) и пропитки под давлением. Компаундирование производят в том случае, когда обмотка предназначена для работы в тяжелых эксплуатационных условиях (ионизация воздуха, которая может привести к ускоренному старению изоляции обмоток высокого напряжения, высокая влажность воздуха и др.). При компаундировании воздушные промежутки в изоляции исчезают в результате заполнения их компаундом и опрессовывания, что повышает ее электрическую и механическую прочности,

уменьшает диэлектрические потери, создает устойчивость против влияния окружающей среды и улучшает теплопроводность. В процессе компаундирования происходит подсушивание изоляции (удаление из нее влаги и растворителей). Процесс компаундирования обмоток заключается в том, что эпоксидный компаунд, обычно разогретый до 50–60 °C, или разжиженный битумный компаунд (при 150–160 °C) под действием вакуума и давления проникает в изоляцию обмоток. Соотношение эффективности пропитки и гидростатического опрессовывания зависит от пропитываемой изоляции, выбранных составов и режимов пропитки. Обычно при применении битумных компаундов происходят в одинаковой мере пропитка и гидростатическое опрессовывание, в эпоксидных — превалирует пропитка. При компаундировании обмотки должны быть загружены в котел таким образом, чтобы между ними были зазоры не менее 3 мм. Катушки должны быть соответствующим образом закреплены на рамах, как в пазовой, так и в лобовой их частях. На длинных пазовых частях обмоток должны быть прикреплены опорные планки во избежание их деформации при компаундировании. В ходе пропитки битумным компаундом после сушки при постепенном подъеме температуры до оптимального значения (155–165 °C) производится вакуумирование. В первый период основное назначение вакуума — ускорение процессов сушки, и ее достаточно производить при давлении примерно 4–5,5 кПа. Вакуумную сушку следует чередовать с сушкой при атмосферном давлении (так называемый «промежуточный прогрев»), при которой создаются благоприятные условия десорбции и процесс удаления тяжелых летучих ускоряется. В первые часы микалентную изоляцию следует сушить без вакуума с постепенным подъемом температуры, т. к. в ней содержится много растворителей (6–10 %) и при вакууме или резком нагреве могут произойти вспучивание изоляции и ухудшение ее качества. При этом в неплотности изоляции будет затекать компаунд, который создаст местные утолщения. Такое же явление происходит и при слишком длительной сушке микалентной изоляции до компаундирования, т. к. последующее гидростатическое опрессовывание жесткой изоляции будет затруднено. Время сушки и вакуумирования при 150–165 °C для микалентной изоляции толщиной 2,5–3,0 мм составляет примерно 20 ч, толщиной 1–2 мм — 13 ч, двухслойной микалентной

изоляции — 5–6 ч. В связи с тем, что изоляционные ленты изоляции «монолит» не содержат летучих и неупруги, сушка при атмосферном давлении и постепенность подъема вакуума для этой изоляции нежелательны, т. к. могут привести к улетучиванию ускорителя в верхнем ее слое. Для изоляции «монолит» желательно как можно быстрее достичь глубокого вакуума. Для качества компаундирования глубина вакуумирования перед и во время подачи компаунда в котел играет первостепенную роль. Компаунд проникает в изоляцию обмоток до тех пор, пока давление на него (0,7–0,8 МПа) уравняется с давлением внутри изоляции. Чем глубже вакуум, тем меньше воздуха остается в изоляции и тем глубже компаунд проникает в нее. Поэтому в последний период вакуумной сушки перед заполнением котла компаундом, особенно в момент его поступления, необходимо поддерживать остаточное давление не более 2,7 кПа для битумного компаунда и 0,65 кПа для эпоксидного, пропитывающего изоляцию «монолит». Для стабильности процесса компаундирования необходимо, чтобы температуры нагрева катушек и компаунда имели минимальные колебания.

Температура катушек перед подачей компаунда в рабочий котел должна быть, возможно, близка к температуре компаунда, т. к. он, попадая на более нагретую или более холодную поверхность, меняет свою вязкость и пропитывающую способность. Если обмотка будет на 10 °С холоднее компаунда, то он, проникнув в обмотку, остынет, вязкость его повысится, и вместо того, чтобы проникнуть в глубь изоляции, он задержится в поверхностном слое. Температура обмотки с изоляцией «монолит» должна быть на 10 °С выше температуры эпоксидного компаунда (соответственно 70 и 60 °С). Скорость подачи разогретого компаунда в рабочий котел может быть любой (от 15 мин до 2–3 ч) при условии, что за этот период вакуум будет максимальным, температура нагрева обмоток и компаунда не снзится и обмотки не деформируются. Рекомендуется эпоксидный компаунд первоначально подавать в котел в таком количестве, чтобы он не полностью закрывал обмотки; когда вакуум достигнет необходимого значения, добавить остальной, после чего подать на него давление. Эпоксидный компаунд при пропитке обмоток старится, поэтому следует по возможности сократить время пропитки путем снижения вязкости компаунда (до 20–40 с), что достигают рацио-

нальной технологией, при которой обеспечивается его постоянное обновление. Рекомендуемые режимы пропитки эпоксидным компаундом изоляции «монолит» приведены в табл. 95.

По окончании процесса компаундирования производят выпуск компаунда и разгрузку котла. Выпуск компаунда должен занимать 15–30 мин, т. к. при очень быстром выпуске возникают большие импульсные динамические усилия, которые могут исказить форму обмотки, а при медленном может произойти вспухание изоляции. При компаундировании битумный компаунд засасывается в рабочий котел под вакуумом, а затем на компаунд подают давление 0,7–0,8 МПа. При компаундировании битумным компаундом, который, находясь в жидком состоянии, гигростатически опрессовывает изоляцию катушек (при равномерном удельном давлении согласно закону Паскаля), одновременно происходит ее пропитка. Глубина пропитки изоляции битумным компаундом зависит от температуры его размягчения и продолжительности пропитки (рис. 161).

Чем выше температура битумного компаунда, тем больше его пропитывающая способность, и чем выше температура его размяг-

Таблица 95

Режимы компаундирования изоляции «монолит-2» эпоксидным компаундом

Операция в рабочем котле	Температура, °С	Давление, Па	Продолжительность операции, ч, для катушек напряжением до	
			660 В	6600 В
Загрузка изделий в рабочий котел	–	–	0,4	0,4
Сушка при атмосферном давлении	70–80	–	1	2
Вакуумирование	60–70	$(13–65)10^2$	1,5	2
Подача компаунда	50–60	$(13–65)10^2$	0,2–0,5	0,2–0,5
Дополнительная подача компаунда	50–60	$(13–65)10^2$	0,1–0,3	0,1–0,3
Компаундирование	40–60	$(0,7÷0,8)10^6$	2	3
Выпуск компаунда из котла	40–60	$(0,7÷0,8)10^6$	0,2–0,3	0,2–0,21
Стекание компаунда с катушек	60–20	$1×10^5$	0,5–1	0,5–1
Разгрузка котла	20	$1×10^5$	0,3–0,4	0,3–0,4

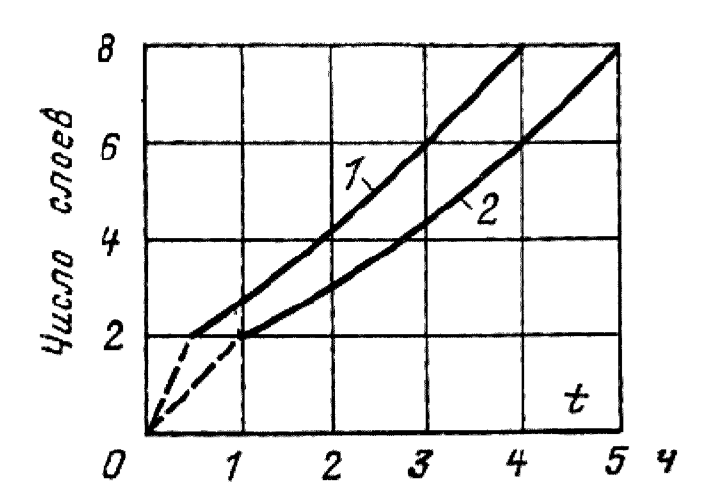


Рис. 161. Зависимость времени компаундирования катушек от количества слоев микаленты: 1 — в битуме с температурой размягчения 101°C; 2 — в битуме с температурой размягчения 105 °C

чения, тем меньше изменяется пропитывающая способность компаунда при колебаниях температуры (рис. 162). Несмотря на стремление иметь максимальную пропитывающую способность битумного компаунда, температуру его размягчения нельзя выбирать низкой, чтобы при эксплуатации компаунд не вытекал и изоляция не вспухала и чтобы не снижалась стабильность процесса компаундирования. Однако с повышением температуры размягчения битумного компаунда и снижением его пропитывающей способности ухудшается насыщение им изоляции, что приводит к повышенному ее вспуха-

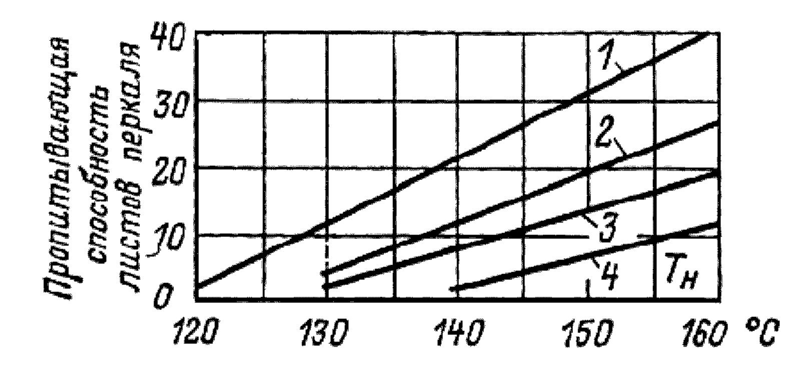


Рис. 162. Зависимость пропитывающей способности битума от температуры его размягчения (по «кольцу и шару») и температуры нагрева: Т
1 — температура размягчения по «кольцу и шару» 106 °C; 2 — то же 115 °C; 3 — то же 121 °C; 4 — то же 125 °C

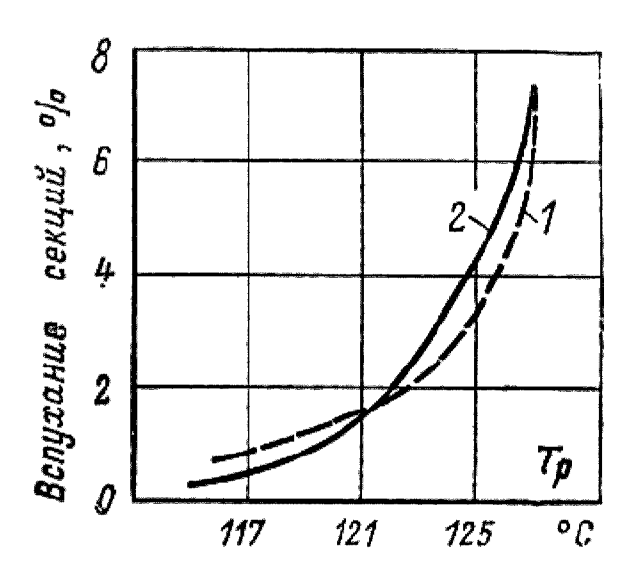


Рис. 163. Зависимость количества вспухших после компаундирования катушек (%) от температуры размягчения битума$_{р}$Т1 — катушка одного типа; 2 — среднестатистические данные по партиям компаундирования (для ряда типов)

нию после компаундирования (рис. 163). При сравнении катушек, компаундированных битумных компаундом с температурой размягчения 117 °С по «кольцу и шару» (пропитывающая способность 18 литров шифона) и 127 °С (пропитывающая способность шесть литров шифона) при температуре в котле в обоих случаях 160 °С, установлено, что катушки после компаундирования имели одинаковые размеры, но компаунд с температурой размягчения 117 °С проник вглубь, а с температурой 127 °С лежал слоем на поверхности изоляции, которая фактически подверглась только гидростатическому опрессовыванию. Электрические параметры изоляции катушек, прокомпаундированных компаундом с температурой размягчения 117 °С, оказалась выше, чем компаундом с температурой размягчения 127 °С. Рекомендуется температуру размягчения битумного компаунда для компаундирования обмоток с микалентной изоляцией, работающих при температуре не выше 105 °С, устанавливать в пределах 115–119 °С по «кольцу и шару». Для пропитанных битумными компаундами обмоток с микалентной изоляцией допустимая рабочая температура обмотки принимается в зависимости от температуры размягчения применяемого компаунда. Температура нагрева обмоток в процессе сушки и температура компаунда должны быть

160±5 °С, а для получения более стабильных по толщине изоляции компаундированных обмоток желательно максимально сузить диапазон температуры размягчения битумного компаунда. При повышении температуры размягчения компаунда на 1 °С его пропитывающая способность снижается на 4,5 %, при повышении температуры нагрева компаунда на 1 °С его пропитывающая способность увеличивается на 2 %. В табл. 96 приведены рекомендуемые режимы

Таблица 96

Ориентировочные режимы компаундирования обмоток битумным компаундом

Операция	Продолжительность операции, ч		
	Катушки из проводов ППЛБО без корпусной изоляции	Заготовка с дополнительной витковой изоляцией, а также обмотки с корпусной изоляцией не более чем из двух слоев микаленты	Статорные катушки, изолированные микалентой на 3300–6600 В
Загрузка изделий	0,25–0,5	0,25–0,5	0,25–0,5
Сушка в рабочем котле при подъеме температуры от 60 до 140 °С (с открытым краном)	–	–	–
Сушка в рабочем котле с открытым краном при 140–155 °С	2	3	3
Сушка под вакуумом (остаточное давление не более 5–7 кПа) при 155±10 °С	1	3	2
Промежуточный прогрев при атмосферном давлении и температуре 155±10 °С	–	–	1
Сушка под вакуумом (остаточное давление не более 2–2,7 кПа) при 160±5 °С	–	–	4,0–6,0
Подача массы, нагретой до 160±2 °С, в рабочий котел	0,5–1	0,5–1	0,5–1
Компаундирование при температуре 160±5 °С и давлении 0,7–0,8 МПа	1	3	4–5
Выпуск массы из рабочего котла	0,5–1	0,5–1	0,5–1
Выгрузка обмоток	0,25–0,5	0,25–0,5	0,25–0,5
Общая продолжительность процесса компаундирования	6	11	19–22

компаундирования обмоток битумным компаундом для электрических машин мощностью до 1000 кВт.

Если обмотка должна работать в условиях высокой влажности или в воде, ее рекомендуется пропитывать или заливать компаундами МБК. Перед пропиткой или заливкой в компаунд вводят 0,1 % перекиси бензоила. Для заливки компаундом обмотки, установленные в формы, предварительно сушат в печи при определенной температуре до тех пор, пока не будет удалена влага. В нагретые обмотки заливают жидкий компаунд, после чего их охлаждают до комнатной температуры и вакуумируют при остаточном давлении 650–2650 Па в течение 0,5–1 ч, а затем запекают при 70–75 °С 10–20 ч, при 100–130 °С 8–10 с. Пропитку обмоток производят многократно: первую под вакуумом, а последующие методом окунания. После каждой из пропиток обмотки сушат при 100–110 °С 1–2 ч, а после последней при 120–130 °С 6–10 ч.

6. КОНТРОЛЬ И ИСПЫТАНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ОБМОТОК И КОНТРОЛЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

6.1. Испытания изоляции в процессе изготовления электрической машины

Качество изоляции узлов электрических машин определяется в основном правильным выбором материалов, рациональной конструкцией (подбором оптимального сочетания материалов, надежностью крепления и др.), а также правильной технологией изготовления. Однако при изготовлении и укладке обмоток могут быть случаи повреждения изоляции. Поэтому для своевременного предотвращения брака готовых машин или их преждевременного выхода из строя следует испытывать изоляцию обмоток как в процессе их изготовления, так и при последующих операциях, воздействующих на изоляцию при изготовлении электрической машины.

Так как основным параметром изоляции обмоток, определяющим ее пригодность в процессе эксплуатации машины, является пробивное напряжение, то во время изготовления машины качество изоляции проверяют повышенным напряжением. Следует испытывать все элементы изоляции обмотки (витковую, корпусную, междуфазную изоляцию) или изоляционной конструкции (коллекторные манжеты, межламельную изоляцию, изоляцию втулок контактных колец и т. п.). Так как повреждения изоляции могут возникнуть на любом этапе изготовления, испытания следует проводить после каждой из основных технологических операций. Напряжение при испытаниях выбирают таким образом, чтобы выявить опасные дефекты в изоляции (проколы, надрывы, смещения, надломы), но при этом не повредить изоляцию. Следует отметить, что эти испытания сами по себе не дают гарантии эксплуатационной надежности изоляции. Они позволяю лишь определить со-

ответствие качества изготовляемой изоляции необходимому при эксплуатации изоляции в машинах или установленному при ее функциональных испытаниях. Пробивное напряжение изоляции электрических машин низкого напряжения высокое при невысоких рабочих и соответственно невысоких испытательных напряжениях, и поэтому она пробивается при испытании напряжением практически в месте прокола, надрыва и т. п. Выявить места полных и частичных проколов очень важно, т. к. в проколы в дальнейшем могут проникнуть влага и загрязнения, пробивное напряжение по их поверхности значительно снизится и пробой возникнет при рабочем напряжении. Проколы обычно образуются вследствие заусенцев в магнитопроводе, особенно на выходе из паза, и в процессе работы машины частичные проколы могут развиваться. Для изоляции низкого напряжения испытательное напряжение обычно превышает рабочее в 4–10 раз. Пробивное напряжение пазовой изоляции машин низкого напряжения без проколов или надрывов высокое, и при испытании контрольным напряжением (до 3000 В) пробой изоляции происходит только в местах ее нарушения (рис. 164, табл. 97).

При испытании напряжением изоляции низкого напряжения электрического старения не происходит, поэтому время испытаний можно не ограничивать, и оно обычно равно 10 с, т. к. этого времени

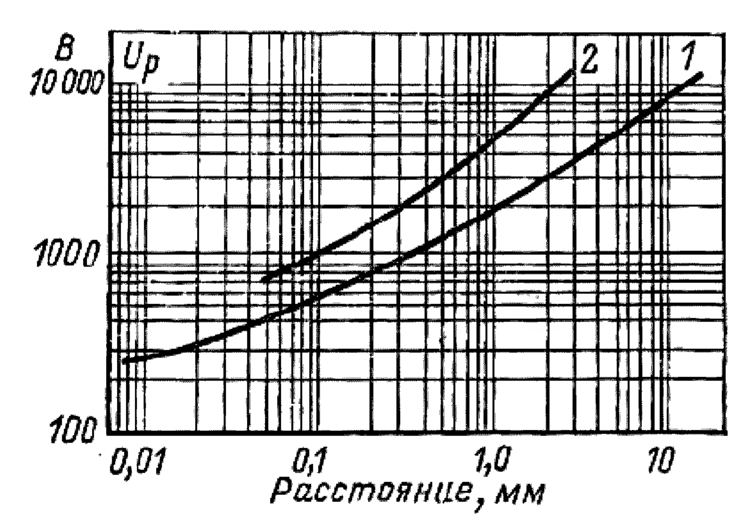


Рис. 164. Разрядные напряжения при атмосферном давлении:
1 — по поверхности сухой машинной изоляции (по Маркрофту);
2 — в воздухе в равномерном поле

Таблица 97

Пробивные напряжения материалов в макете паза

Материал	Марка	Толщина, мм	Пробивное напряжение материала, кВ			
			в исходном состоянии		с проколом	
			U	σ	U	σ
Полиэтилен-терефталатная пленка	ПЭТФ	0,1	15,2	2,2	1,64	0,44
		0,2	15,0	1,7	2,3	0,35
Тривольтерм	P	0,2	12,4	0,5	1,8	0,35
	N	0,25	16,2	1,1	2,2	0,2
Пленкосинтокартон	ПСК-Л	0,24			2,25	0,13
	ПСК-Ф	0,25	16,6	0,7	2,0	0,4
	ПСК-Ф	0,35	>20,0	>20	2,35	0,23
					2,46	0,24
Стеклолакоткань	ЛСБ	0,17	6,4	0,20	1,7	0,33
	ЛСБ	0,17	9,7	1,5	1,6	0,7
	ЛСЛ	0,17	7,5	1,4	1,4	0,28
	ЛСП	0,17	9,0	0,9	1,6	0,44
Гибкий слюдинит	$Г_2СП$	0,2	5,0	1,0	1,7	0,4
		0,2	7,0	1,5	1,3	0,6
Гибкий стекломиканит	ГФС-ТТ	0,22	3,5	1,2	1,6	0,4
		0,34	3,3	0,8	1,8	0,55
Гибкий миканит	ГФС-ББ	0,24	4,6	1,6	1,6	0,36
Гибкий стеклослюдопласт	ГИП-ЛСЛ-ЛСБ	0,55	16,2	1,1	3,9	1,1
	ГИТ-Т-ЛСБ	0,45	11,7	2,5	2,4	0,9
Микалента	ЛФС-ТТ	0,17×4	7,0	1,3	3,2	0,8
	ЛМЧ-ББ	0,17×4	8,2	2,6	2,8	0,65

достаточно для выявления повреждения изоляции. В месте прокола изоляции низкого напряжения пробивное напряжение обычно в несколько раз превышает рабочее, в месте прокола изоляции обмотки высокого напряжения — обычно ниже рабочего. Так как изоляция обмоток высокого напряжения сравнительно прочная, то она большей частью не прокалывается полностью, но в случае повреждения на уцелевших слоях возникают высокие напряженности электриче-

ского поля, приводящие к пробою изоляции. Испытательные напряжения изоляции высокого напряжения обычно не превышают четырехкратного значения рабочего напряжения, т. к. при неоднократном приложении они могут привести к электрическому старению изоляции. Время приложения испытательного напряжения выбирается так, чтобы выявились дефекты изоляции, но не произошло ее старения под действием электрического поля. Так как во время испытаний могут проявляться незавершенные пробои, для обмоток высокого напряжения обычно время испытаний принимают равным 60 с. По мере изготовления обмотки вероятность повреждения изоляции увеличивается, и при переходе от одной технологической операции к другой испытательные напряжения снижаются, что также должно обеспечить отбраковку уже поврежденной изоляции. Значения испытательных напряжений корпусной изоляции различных узлов электрических машин, установленные многолетней практикой, приведены в табл. 98–102.

При испытании изоляции тропического исполнения, которая должна быть особенно надежной, все указанные нормы повышают на 10 %. Изоляция считается годной, если во время испытаний не происходит ни ее пробоя, ни перекрытия скользящими разрядами, ни резкого повышения тока утечки.

До укладки испытывают относительно корпуса лишь обмотки, изолированные полностью. На часть обмотки, подвергаемую испытанию, накладывают электрод из алюминиевой фольги или стальную коробочку. Для обмоток низкого напряжения длина электрода должна равняться длине магнитопровода (пакета стали), для обмоток высокого напряжения рекомендуется удлинять электроды до уголков, где обычно изоляция несколько ослаблена, в то время как изоляция уголков может находиться в зоне наибольших градиентов электрического поля машины. Напряжение обычно подают на медь обмотки, а электроды заземляют. Испытания обмоток после укладки производят до соединения и пайки, после соединения и пайки и в готовых машинах.

Высокое напряжение подают от специального испытательного трансформатора, мощность которого P, В·А, выбирают, исходя из испытательного напряжения максимально возможной емкости испытуемого объекта, по следующему выражению:

Таблица 98

Испытательные напряжения статоров относительно корпуса и между фазами

Объект испытаний	Мощность машины, кВт	Номинальное напряжение, В	Испытательное напряжение, В				Длительность испытания, с
			до укладки	после укладки или сборки до пайки	после соединения и пайки	после пропитки, сушки и запрессовывания пакета в станину	
Всыпные обмотки асинхронных двигателей и синхронных генераторов	0,05–0,2	До 36	–	700	650	600	10
	0,05–0,4	Свыше 36 до 250	–	1500	1300	1200	10
	0,4–10	До 500	–	2500	–	2200	10
	0,4–100	До 600	–	3000	2700	2500	60
Обмотки с жесткими полукатушками в изолированном пазу	100–400	До 660	–	3500	3000	–	60
Обмотки с жесткими изолированными катушками	100–500	До 500	4500	3500	3000	–	60
	100–500	Свыше 500 до 660	5000	4000	3500	–	60
	До 100	Свыше 660 до 3300	13500	11500	9000	–	60
	До 100	Свыше 3300 до 6600	22000	18500	17500	–	60
Катушки роторов синхронных явнополюсных машин, предназначенных для пуска с обмоткой возбуждения, замкнутой на источник питания	До 1000	До 150	3000	2500	2000	–	60
То же для пуска с разомкнутой секционированной обмоткой возбуждения	До 100	–	6000	5000	3500	–	60
То же с несекционированной обмоткой возбуждения	До 100	-	10000	9000	8500	-	60

Таблица 99

Испытательные напряжения изоляции роторов и якорей относительно корпуса и между фазами

Обмотки	Мощность, кВт	Рабочее напряжение, В	Испытательное напряжение, В				Длительность испытания, с
			до укладки в пазы	после укладки в пазы	после соединения, заклинивания и бандажирования	готового якоря после пропитки и обточки коллектора	
1	2	3	4	5	6	7	8
Якоря	≤ 3	≤ 36	-	1000	800	700	10
Якоря с не полностью наложенной корпусной изоляцией	≤ 3	Свыше 36 до 500	-	2700	2500	2300	10
Якоря с полным изолированием	≤ 3	Свыше 36 до 500	3000	2900	2500	2300	10
Якоря с не полностью наложенной корпусной изоляцией	> 3	≤ 110	-	2800	2600	2400	60
	> 3	Свыше 110 до 300	-	3000	2700	2500	60
Якоря с полностью наложенной корпусной изоляцией	> 3	Свыше 110 до 300	3500	3200	3000	2700	60
	> 3	Свыше 300 до 500	3800	3500	3300	3000	60
	> 3	Свыше 500 до 800	4500	4000	3500	3200	60
	> 3	Свыше 800 до 1000	5500	4800	4500	3800	60
	> 3	Свыше 1000 до 1650	7000	6000	5800	5500	60
	> 3	Свыше 1650 до 3000	13500	11500	10000	9000	60

Таблица 99 (окончание)

1	2	3	4	5	6	7	8
Катушечные роторов	≤ 100	≤ 500	–	3500	3000	–	60
Стержневые роторов	≤ 100	≤ 500 нереверсивные	4000	3000	2500	–	60
	≤ 100	≤ 500 реверсивные	5000	4000	3500	–	60
	Свыше 100 до 1000	От 500 до 1000 нереверсивное	5000	4000	3500	–	60
		От 500 до 1000 реверсивное	7000	6000	5500	–	60
		От 1000 до 1500 нереверсивное	5500	5000	4500	–	60
		От 1000 до 1500 реверсивное	9000	8000	7500	–	60
		От 1500 до 2500 нереверсивное	8000	7000	6500	–	60
		От 1500 до 2500 реверсивное	13000	12000	11500	–	60

Таблица 100

Испытательные напряжения изоляции между обмоткой возбуждения и корпусом

Обмотки	Мощность, кВт	Номинальное напряжение, В	Испытательное напряжение, В	
			до надевания на полюс	после сборки станины
Главных и добавочных полюсов на каркасах, надеваемых на изолированные полюсы	≤ 3	≤ 36	1000	800
	≤ 3	Свыше 36 до 500	2700	2500
	>3	≤ 110	2700	2500
	> 3	Свыше 110 до 500	3500	3000
	>3	Свыше 500 до 800	4200	3500
	>3	Свыше 800 до 1000	5000	4000
	> 3	Свыше 1000 до 1650	5800	5500
	> 3	Свыше 1650 до 3000	10000	9000
Главных и добавочных полюсов, надеваемых на изолированные полюсы	≤ 3	≤ 24	–	800
	> 3	Свыше 24 до 110	–	2500
	> 3	Свыше 110 до 500	–	3000
	> 3	Свыше 500 до 800	–	3500
	> 3	Свыше 800 до 1000	–	4000
	> 3	Свыше 1000 до 1650	–	5500
	> 3	Свыше 1650 до 3000	–	9000

Таблица 101

Испытательное напряжение контактных колец относительно корпуса и между собой

Кольца	Номинальное напряжение, В	Испытательное напряжение, В, в течение 60 с	
		После насадки колец на втулку или на траверсу	В готовом контактном устройстве
Асинхронных двигателей нереверсивного исполнения	≤ 500	3500	3000
	Свыше 500 до 1000	4500	4000
	Свыше 1000 до 1500	5500	5000
	Свыше 1500 до 2500	7500	7000
Асинхронных двигателей реверсивного исполнения	≤ 500	4500	4000
	Свыше 500 до 1000	6500	6000
	Свыше 1000 до 1500	8500	8000
Синхронных машин	≤ 200	4000	3000
	Свыше 200 до 300	5000	4000
	Свыше 300 до 400	5500	4500
	Свыше 400 до 800	7500	6000

Таблица 102

Испытательные напряжения изоляции коллектора относительно корпуса

Объект испытания	Номинальное напряжение, В	Испытательное напряжение, В, в течение 60 с		
		Машины постоянного тока, кроме возбудителей	Возбудители синхронных генераторов	Возбудители синхронных двигателей и компенсаторов
Коллекторы машин мощностью до 3 кВт	≤ 36	1300	–	–
Коллекторы машин мощностью свыше 3 кВт	Свыше 36 до 110	3000	3000	3500
	Свыше 110 до 500	3500	4000	5000
	Свыше 500 до 1000	5000	5500	7000
	Свыше 1000 до 1650	6000	–	–
	Свыше 1650 до 3000	9000	–	–
Манжеты коллекторов после изготовления	≤ 36	2300	–	–
	Свыше 36 до 110	4000	5500	6000
	Свыше 110 до 500	5000	7000	8000
	Свыше 500 до 1000	6500	8000	10 000
	Свыше 1000 до 1650	7000	–	–
	Свыше 1650 до 3000	13 500	–	–

$$P = U_{исп}^2 \omega C, \qquad (6.1)$$

где $U_{исп}$ — эффективное значение испытательного напряжения, В; ω — угловая частота, Гц; C — емкость испытуемого объекта, Ф.

Номинальная мощность трансформатора должна быть не менее 0,5 кВ·А.

При выборе испытательных напряжений витковой изоляции исходят не столько из значения напряжений на витках при работе электрической машины, сколько из значений коммутационных, а для ряда машин и грозовых перенапряжений, по которым конструктор определяет тип витковой изоляции обмотки. Верхний предел испытательных напряжений определяется разрядным напряжением витковой изоляции данного типа и необходимым коэффициентом запаса (должен равняться 40–50 % среднего пробивного напряжения витковой изоляции); нижний предел — возможностью пробоя воздушного зазора между смежными проводниками при повреждении витковой изоляции (см. рис. 164). При напряжении 1400 В на виток можно обнаружить дефект в изоляции толщиной 0,7 мм. Практически для витковой изоляции обмоток высокого напряжения толщиной 0,6–0,85 мм принято испытательное напряжение 1400 В — нижний предел испытательных напряжений. Испытательные напряжения витковой изоляции намного превышают значения рабочих напряжений на витках обмотки (табл. 103 и 104).

При укладке обмоток в пазы или надевании на полюсы изоляция обмоток подвергается механическим воздействиям и как следствие деформируется, поэтому витковую изоляцию обмоток следует снова испытать напряжением, сниженным на 20–30 % по сравнению со значениями испытательных напряжений до укладки или надевания на полюсы. Так как большинство витковых перенапряжений имеет импульсный характер, испытания витковой изоляции неразрезных катушек обычно производят импульсным напряжением. Время приложения напряжения, как правило, не превышает 15 с, благодаря чему витковая изоляция в процессе испытаний не старится. Испытательные напряжения витковой изоляции выбраны таким образом, что во время испытаний не происходит повреждения корпусной изоляции. Взаимодействие импульсных напряжений безопасно при напряжениях, равных 3,0–3,5 $U_н$. Разрезные обмот-

Таблица 103

Испытательные напряжения междувитковой изоляции статорных и якорных обмоток

Обмотки	Мощность машины, кВт	Номинальное напряжение, В	Испытательное напряжение, В				
			до укладки	после укладки до пайки	после соединения с коллектором или пайки	после пайки и пропитки	в готовой машине
Всыпные обмотки статоров	≤ 0,2	≤ 36	–	300 на группу	800 на две фазы	700 на две фазы	–
	≤ 0,4	Свыше 36 до 250	–	500 на группу	1700 на две фазы	1500 на две фазы	–
Всыпные, провода с эмалевой изоляцией	≤ 10	Свыше 250 до 660	–	700 на группу	2700 на две фазы	2500 на две фазы	–
Всыпные, провода с волокнистой и эмальволокнистой изоляцией	≤ 10	Свыше 250 до 660	–	1000 на группу	3000 на две фазы	2800 на две фазы	–
Обмотки с жесткими полукатушками, провода с эмалевой и волокнистой изоляцией	10–100	Свыше 250 до 660	300 на виток	250 на виток	3000 на две фазы	–	–
Обмотки с жесткими катушками и дополнительной изоляцией прокладками толщиной 0,10–0,15 мм	10–100	Свыше 250 до 660	500 на виток	400 на виток	3000 на две фазы	–	–
То же толщиной 0,2–0,25 мм	10–100	Свыше 250 до 660	800 на виток	700 на виток	3000 на две фазы	–	–

Таблица 103 (окончание)

Обмотки	Мощность машины, кВт	Номинальное напряжение, В	Испытательное напряжение, В				
			до укладки	после укладки до пайки	после соединения с коллектором или пайки	после пайки и пропитки	в готовой машине
Обмотки с жесткими полукатушками	> 100	Свыше 660 до 6600	1500 на виток	1000 на виток	–	–	–
Всыпные обмотки якоря, провод с эмалевой изоляцией	≤ 3	–	–	300 на катушку	200 на катушку	–	150 на катушку
Всыпные якоря, провод с волокнистой и эмаль-волокнистой изоляцией	≤ 3	–	–	500 на катушку	300 на катушку	–	250 на катушку
	> 3	500	300 на виток	250 на виток	2200	–	2000
	> 3	Свыше 500 до 1000	750 на виток	500 на виток	3200	–	3000
Обмотки с жесткими катушками	> 3	Свыше 1000 до 3000	1500 на виток	1200 на виток	5200	–	5000

Таблица 104

Испытательные напряжения межвитковой изоляции полюсных катушек

Обмотки	Испытательное напряжение, В	
	после намотки	после сборки, до пайки соединений
Главных полюсов, параллельные, из проводов с эмалевой изоляцией (намотка «в навал»)	1500	1000
То же, из проводов с волокнистой и эмаль-волокнистой изоляцией	2000 на катушку	1500 на катушку
Главных полюсов последовательные и добавочных	300 на группу	150 на группу
Катушки генераторов мощностью до 100 кВт с намоткой на полюс	300 на виток, < 2000 на катушку	150 на группу
Катушки генераторов мощностью свыше 100 кВт из неизолированного провода, намотанного на ребро	200 на виток, < 2000 на катушку	1000

ки обычно испытывают путем приложения к двум соседним виткам испытательного напряжения частотой 50 Гц. Очень важно соблюдение процесса пропитки и сушки обмоток. Если сушку производят при низких температурах, изоляционные лаки в обмотке остаются непросушенными, что может привести к пробою изоляции (особенно при пропитке водоэмульсионными лаками) и деформации обмоток вращающихся частей. При недопустимо высоких температурах сушки изоляции может состариться и прийти в негодность. Для обеспечения необходимого качества пропитанных обмоток следует контролировать качество лаков и компаундов и режимы сушки и пропитки. Необходимо проверять лаки и компаунды как до, так и после заполнения пропиточных ванн, компаундных котлов и автоклавов. При контроле из пропиточных ванн нужно проверять количество пленкообразующих в них и их вязкость, т. к. последняя зависит не только от количества пленкообразующих, но и от примененных растворителей и коллоидного состояния лака. При частичном коагулировании лаковой основы, а также при начале распадания водной эмульсии обычно резко повышается вязкость лака. В случае повышения вязкости лака при снижении или неизменном количестве пленкообразующих его необходимо заменить либо до-

бавить разбавитель для прекращения коагуляции (например, для лаков МЛ-92 и КО-916к ксилол), а в эмульсии добавить стабилизатор. Температура размягчения пропиточных битумных компаундов в процессе их нагрева в смесительных и рабочих котлах повышается из-за окислительных процессов и испарения легкокипящих частей. Контролируя температуру размягчения, устанавливают необходимость добавления битума с более низкой температурой размягчения. Особенно важен тщательный контроль термореактивных компаундов, например эпоксидных, вязкость которых после пропиток и хранения может значительно повыситься, а жизнеспособность снизится. Следует стремиться к максимальному обновлению таких компаундов путем добавления в них свежих порций, а также обеспечивать, возможно, более низкие температуры при их использовании и хранении. В процессе сушки обмоток до и после пропитки, а также при компаундировании необходим контроль температур, вакуума и давления. По окончании каждого цикла сушки обычно мегаомметром измеряют сопротивление изоляции узлов в нагретом состоянии. При установлении норм на сопротивление изоляции, Мом, для контроля пропитки и сушки обмоток низкого напряжения обычно руководствуются выражением:

$$R_{из} = U/(1000 + P/100), \qquad (6.2)$$

где U — номинальное напряжение, В; P — мощность машины, кВт.

Нормируемое значение $R_{из}$ следует ставить в зависимость не только от номинальных данных машин, но и от конструктивных размеров обмотки, что позволит предъявить равные требования к качеству изоляции машин различных габаритов. Значение $R_{из}$ устанавливают опытным путем. Снимают кривые зависимости сопротивления изоляции от времени сушки (рис. 165). Стабилизация сопротивления указывает на завершение процесса сушки, при котором сначала происходит разогрев изоляции (снижение сопротивления), а затем удаление влаги, растворителей и запечка (повышение сопротивления). Следует учитывать, что по мере увеличения числа пропиток (лучшего заполнения пустот пропиточным материалом) сопротивление изоляции снижается (рис. 166), т. к. лаковая основа имеет более низкое сопротивление, чем вытесненный из пустот воздух. В ряде конструкций стабилизация зна-

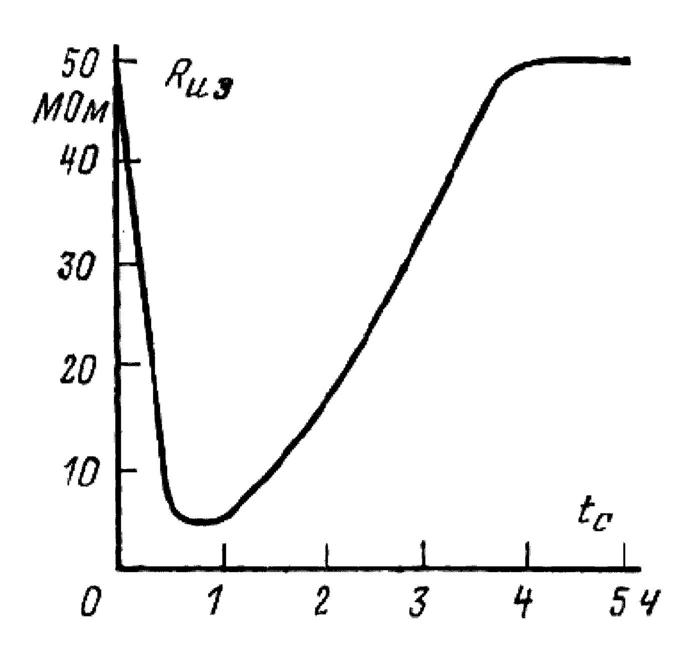


Рис. 165. Типичный график зависимости сопротивления изоляции обмоток от времени сушки t_c

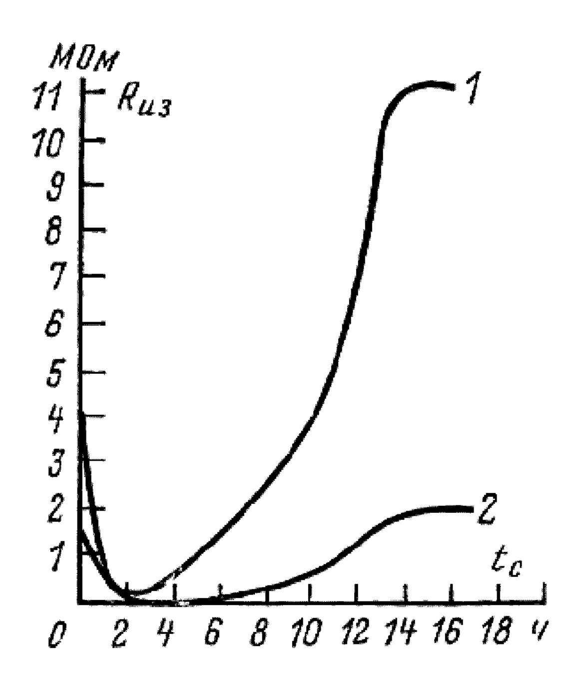


Рис. 166. Сопротивление изоляции роторных обмоток в процессе сушки после однократной и двукратной пропиток: 1 — после первой пропитки; 2 — после второй пропитки

чения сопротивления изоляции указывает лишь на относительное высыхание лака. Так как сопротивление корпусной изоляции, выполненной с применением пленок или в виде твердой гильзы, сразу

же после пропитки велико, то время сушки устанавливается визуальной проверкой степени высыхания витковой изоляции и высыхания пропиточного состава внутри пазов и в глубинных слоях катушек нескольких машин данного типа путем извлечения катушек из паза. Для обмоток, пропитанных нетермореактивными лаками (БТ-988, БТ-987 и др.), допускается неполное их высыхание в глубинных слоях. Для вращающихся обмоток и особенно полюсных катушек роторов важна надежная цементация витков и слоев изоляции, которая может быть обеспечена при правильном выборе пропиточного состава его хорошей запечкой. Для установления времени сушки после пропитки обмоток вращающихся частей недостаточно снятия «кривых сушки», т. к. поверхностная пленка состава может иметь высокое сопротивление, но невысохший под ней состав будет разбрызгиваться при вращении обмотки. В таких случаях необходима проверка вращающихся узлов на «разбрызгивание» при максимальных скорости и рабочей температуре. Время сушки считается достаточным, если при этом не наблюдается следов вытекания состава. При установлении режимов сушки вращающихся узлов после пропитки термореактивными составами желательна оценка степени цементации обмоток (отсутствие отгиба обмотки, нагретой до рабочей температуры) центробежными силами при испытательной частоте вращения. Время сушки обмоток уточняют испытаниями на влагостойкость не столько по уровню сопротивления их изоляции, сколько по скорости восстановления сопротивления изоляции увлажненных обмоток. Медленное восстановление сопротивления изоляции указывает на недостаточное высыхание пропиточного состава или (при увеличении продолжительности сушки) на его недостаточную влагостойкость. При хорошей запечке пропиточного состава повышается стойкость изоляции к плесневым грибкам. Нормы сопротивления устанавливают для каждой группы узлов в зависимости от конструкции обмотки и изоляции, примененного пропиточного состава и условий работы электрической машины. Нормы сопротивления изоляции обычно устанавливают для температур, соответствующих классу нагревостойкости. Если сопротивление изоляции измеряется при иной температуре, то его следует пересчитать для нормированной температуры по выражению:

$$R = R_T \cdot 10^{a(T - T_T)}, \qquad (6.3)$$

где R_T — сопротивление при температуре измерения, МОм; T — температура, при которой дана норма на сопротивление, °С; T_T — температура, при которой измерялось сопротивление, °С; a — температурный коэффициент сопротивления,

$$a = (\lg R_1 - \lg R_2)/(T_2 - T_1), \qquad (6.4)$$

(R_1 и R_2 — сопротивления при температурах T_1 и T_2).

Температурный коэффициент сопротивления зависит от примененных электрических материалов, $°С^{-1}$ (табл. 105).

Примеры значений температурного коэффициента системы изоляции приведены на рис. 167. Измеряемое значение сопротивления изоляции зависит от длительности приложения напряжения при испытаниях. Чем больше время, прошедшее с момента приложения напряжения до момента отсчета, тем выше должно получиться сопротивление (особенно для невысохшей изоляции). Поэтому при измерении сопротивления необходимо производить отсчет через определенные промежутки времени (обычно принимается 1 мин). Время выдержки в лаке изделий, пропитываемых методом погружения, устанавливают по прекращению выделения пузырьков воздуха. Для контроля правильности принятого времени пропитки следует проверить степень проникновения лака на нескольких проверочных узлах, т. е. разрезать и осмотреть обмотку. Контроль покрытия обмоток лаками или эмалями производят визуально. Качество пленки лака на пластинах магнитопровода проверяют, пропуская через ла-

Таблица 105

зависимость температурного коэффициента от примененного электрического материала

Электрический материал	Температурный коэффициент, $°С^{-1}$
Бумага, лакоткань	0,66
Синтетическая пленка	0,68
Микалента	0,47
Стекломикалента на глифталевом лаке	0,40
Стекломикалента на кремнийорганическом лаке	0,41
Лаки БТ-988, БТ-987, ФЛ-98	0,092–0,096
Лак МЛ-92	0,121

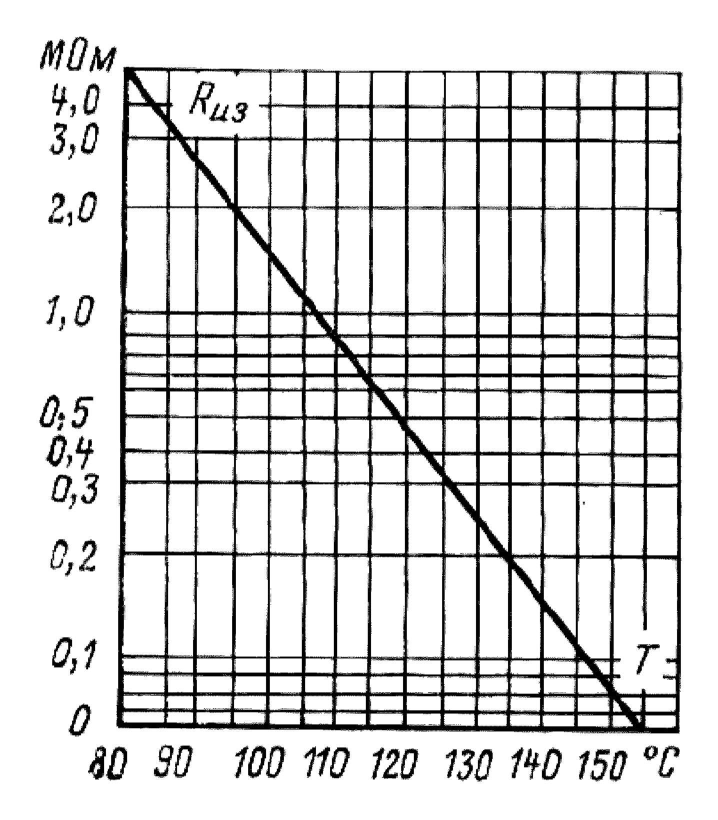


Рис. 167. Зависимость сопротивления изоляции обмоток ротора от температуры

кировочную машину пластины (обычно размером 40×300 мм), которые затем собирают в стандартные пакеты (по 20 шт.). Определяют привес лака и электрическое сопротивление стандартного пакета. При этом в случае однократного лакирования масса лака на стандартный пакет должна составлять 2–3 г (что соответствует толщине лаковой пленки примерно 15 мкм на обе стороны), в случае двукратного лакирования — 4–5 г. При отклонении от указанной нормы следует отрегулировать толщину лаковой пленки путем изменения расстояния между валиками или вязкости лака. Сопротивление стандартного пакета измеряют при напряжении 15–20 В и давлении 1 МПа на специальной установке (рис. 168). Пленка считается качественной, если при однократном нанесении лака сопротивление стандартного пакета будет более 5, при двукратном — более 50 Ом. Качество компаундирования обмоток высокого напряжения определяю внешним осмотром и постукиванием металлическим предметом, при этом обмотка должна издавать звонкий звук. Периодически выборочно определяют тангенс угла диэлектрических потерь

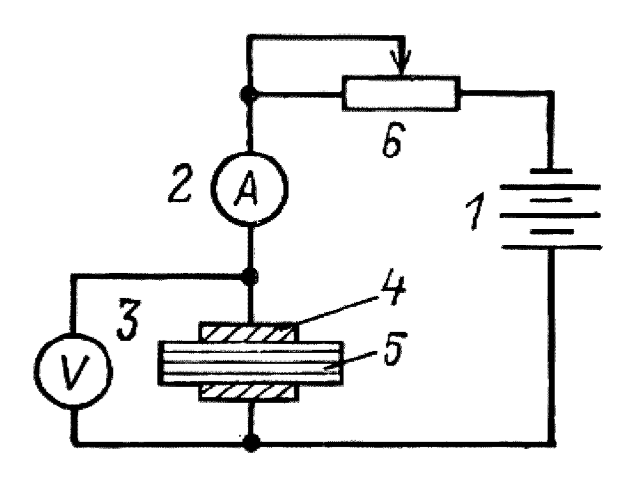


Рис. 168. Схема установки для измерения сопротивления стандартного пакета: 1 — источник постоянного тока напряжением 20 В; 2 — амперметр на 0,5 А с ценой деления 0,001 А; 3 — вольтметр на 20 В с ценой деления 0,1 В; 4 — электроды; 5 — стандартный пакет; 6 — регулировочный реостат на ток 0,1 А

изоляции обмоток на напряжение 6600 В. Диэлектрические потери определяют при частоте 50 Гц на мосте Шеринга. Измерительным электродом должна служить тонкая фольга из алюминия, тщательно притертая к поверхности изоляции обмотки по длине активной стали статора. Измерительный электрод присоединяют к мосту Шеринга, а обмотки — к источнику испытательного напряжения; tgd обычно измеряют при напряжениях 0,5; 1,0 и 1,5 линейного рабочего напряжения машин. В пустотах изоляции обмоток на напряжение 6600 В уже при напряжениях (0,6 - 0,8)$U_{н}$ возникает ионизация; значение tgd при напряжении 6600 В должно быть не более 15 %, а Dtgd (разница между значениями tgd, измеренными при напряжениях, равных 1,5 и 0,5 линейного рабочего) — не более 5 %. В изоляции высокого напряжения на синтетических смолах, выполненной пропиткой под давлением после вакуумирования, возможно появление весьма малых пустот (щелей), расположение и размеры которых далее не меняются. Возникновение таких пустот может быть вызвано недостаточной пропиткой, плохим склеиванием отдельных слоев изоляции между собой или с проводом. Вследствие большого давления при пропитке такие пустоты очень малы (0,01 мм). Напряжение возникновения ионизации зависит от произведения поперечного размера щели на давление газа, а процесс возникновения идет

по левой круто возрастающей ветви кривой Пашена, поэтому в таких щелях ионизация не может возникнуть даже при напряжениях, значительно превышающих рабочее. Для обнаружения опасных пустот необходимо высокое испытательное напряжение, примерно втрое превышающее номинальное. Значение испытательных напряжений и допустимое значение $\Delta \mathrm{tg}\,\delta / \Delta U$ устанавливают индивидуально для каждого типа термореактивной изоляции.

6.2. Испытания на стойкость к воздействию окружающей среды

Изоляцию машин исполнений ХЛ, химически стойкого и Т испытывают на влаго-, химо-, тропико- и холодостойкость. Машины исполнения ХЛ выдерживают при температуре 20±2 °С и относительной влажности воздуха 93–98 % в течение определенного, заданного техническими условиями времени (обычно не менее 7 сут), при этом периодически измеряют сопротивление изоляции. После выгрузки машин из камеры влажности изоляцию немедленно испытывают повышенным напряжением, в зависимости от требований технических условий равным 0,5–0,75 испытательного напряжения готовой машины, после чего машины проверяют при полной нагрузке. Машины химически стойкого исполнения испытывают таким же образом, но выдерживают в испытательных камерах с химически активной средой, заданной техническими условиями, при относительной влажности воздуха около 90 %. Испытания на влагостойкость изоляции машин исполнения Т производят при циклических воздействиях повышенной влажности, повышенной температуры и последующего охлаждения. При этом каждый цикл состоит из воздействия 94–98 % относительной влажности воздуха при 40±2 °С (при длительном режиме испытаний — 4–56 цикла в зависимости от условий работы электрической машины) или 55±2 °С (при кратковременном режиме — 4–21 циклов) в течение 16 часов и охлаждения путем отключения источника тепла не менее чем на 5 °С с выпаданием росы на стенках и полу камеры влажности в течение 8 ч. Режимы испытаний изоляции машин на влагостойкость приведены в табл. 106.

При охлаждении вследствие тепловой инерции температура машины оказывается выше температуры воздуха в камере и на обмотке

Таблица 106

режимы испытания машин на влагостойкость

Количество испытательных циклов при длительном режиме для изделий:	Время, ч
ТС5, Т, ТВ, ТМ с категориями размещения 4.3; 1.1	21
Т, ТВ, ТМ с категориями размещения 1, 2, 5	56
Количество испытательных циклов при кратковременном режиме для изделий:	Время, ч
ТС5, Т, ТВ, ТМ с категориями размещения 4.3; 1.1	9
Т, ТВ, ТМ с категориями размещения 1, 2, 5	21
Продолжительность цикла испытания:	Время, ч
Параметры испытаний:	Температура при режиме, °С
длительном	40±2
кратковременном	55±2
относительная влажность воздуха, %	95±3
продолжительность воздействия, ч	16
Параметры при охлаждении:	Максимальная температура в конце цикла охлаждения при режиме, °С
длительном	35±2
кратковременном	50±2
относительная влажность воздуха, %	94–100
Продолжительность охлаждения, ч	8

не выпадает роса. В начале следующего цикла (при подъеме температуры и влажности воздуха в камере до предельных значений в течение 15–20 мин) машина оказывается холоднее воздуха и на ней выпадает роса. В определенных циклах перед началом охлаждения электродвигатели запускают на холостом ходу при номинальном напряжении, а в генераторах при номинальной частоте вращения регулируют ток возбуждения для получения номинального напряжения на выводах. Такие испытания проводят на последних циклах, а также через каждые 5 циклов при испытании в течение 21 и 42 циклов и на втором и четвертом циклах при испытаниях в течение 7 циклов. В последнем цикле испытаний (перед проверкой работы при номинальном напряжении) изоляцию испытывают напряжением, равным 55 % испытательного напряжения для готовой машины. Если требуется проверка сопротивления изоляции, то в последнем

цикле изделия увлажняют при верхнем значении температуры и при значениях влажности согласно приведенным выше данным, но без конденсации влаги. Допускаются испытания и при непрерывном режиме при относительной влажности 95±3 %. При длительном режиме испытания производят при 40±2 °С, при кратковременном — при 55±2 °С. Машины исполнения ХЛ испытывают на холодостойкость, на воздействие резких смен температуры и влагостойкость. При испытании на холодостойкость электрическую машину помещают в холодную камеру при температуре –45±2 °С на 6 ч и определяют напряжение трогания двигателей после установки их в камеру и перед выгрузкой. Перед испытаниями на воздействие резких смен температур электродвигатели ставят на 5 сут в камеру влажности при 40±2 °С и 95±3 % относительной влажности воздуха. Каждые 12±1 ч замеряют сопротивление изоляции обмоток на корпус и между фазами. Затем электродвигатели подвергают пяти циклам испытаний, каждый из которых состоит из выдержки при –45±2 °С в течение 6 ч и трех пусков вхолостую при номинальном напряжении в конце выдержки (при каждом пуске–остановке должны достигаться установившаяся скорость и полная остановка). Далее двигатели включают на полную нагрузку, повышают температуру в камере до 40±2 °С и выдерживают при ней 4 ч, после чего выключают двигатель и понижают температуру до –45±2 °С. После пяти циклов испытаний замеряют сопротивление изоляции электродвигателей в камере влажности 40±2 °С и 95±3 % относительной влажности. Разность между значениями сопротивлений до и после проведения циклических испытаний не должна превышать 25 %. В конце каждого цикла испытаний на корпус и между обмотками подают испытательное напряжение, равное $1/2U_{исп}$ в течение 5 мин. В последнем цикле вместо охлаждения производят проверку электродвигателя на функционирование — он должен проработать 6 ч при номинальном напряжении и номинальной нагрузке. Допускается испытание двигателей в камере влажности путем периодических пусков и остановок, при которых превышения температуры должны быть такими же, как при номинальной нагрузке. Затем испытывают междувитковую изоляцию электродвигателя на холостом ходу в нагретом состоянии напряжением, превышающим на 30 % номинальное, в течение 5 мин. Минимальное допустимое значение сопротивления изоляции отно-

сительно корпуса и между обмотками в процессе испытаний принято равным 0,5 Мом.

6.3. Испытания на длительность срока службы

6.3.1. Общие положения

Все перечисленные виды испытаний изоляции обмоток определяют ее свойства, но не гарантируют надежности и долговечности. Срок службы изоляции электрической машины зависит от ее способности противостоять длительным воздействиям эксплуатационным факторов. Основным фактором, приводящим изоляцию низкого напряжения в процессе эксплуатации в негодность, является ее температурное старение. Его эффект углубляется тем, что изоляция в процессе эксплуатации подвергается воздействиям механических нагрузок (вибрации, ударов, истирания), влаги и электрического напряжения, постепенно разрушающих ее. При разработке новых типов изоляционных конструкций, замене старых материалов вновь разработанными необходимо оценивать ресурс изоляции — испытывать ее на срок службы. Существует стандарт на общие методические указания по определению нагревостойкости изоляционных материалов и конструкций. Так как основное воздействие на изоляцию в процессе эксплуатации оказывает нагрев, то и основным испытательным фактором при определении срока службы электроизоляционной конструкции является температура. Учитывают также и другие факторы воздействия: влагу, механические нагрузки и электрическое напряжение. При испытании на срок службы все эти дополнительные воздействия выбирают таким образом, чтобы ускорить испытания, но не исказить характера повреждений изоляции, возникающих при эксплуатации. Обычно в процессе эксплуатации все эти факторы воздействуют одновременно, но т. к. одновременное воздействие всех факторов, имитирующих условия эксплуатации, очень усложнило бы испытания, то их проводят циклически, и в каждом цикле, продолжительность которого предположительно равна 1/10 срока службы, испытываемую изоляцию подвергают попеременно воздействию повышенной температуры, механических усилий, повышенной влажности и электрического напряжения. Испытания на срок службы проводят ускоренно при

повышенных температурах, что теоретически обосновано законом зависимости скорости химических реакций от температуры, выраженным уравнениями Вант-Гоффа–Аррениуса. Для получения графика зависимости срока службы от величины, обратной абсолютной температуре, следует проводить испытания не менее чем при трех значениях температуры. Минимальная температура испытаний должна отличаться от предполагаемой рабочей на 15–30 °С, остальные испытательные температуры также должны различаться на 15–25 °С. Максимальная испытательная температура не должна превышать значения температуры теплостойкости изоляции. Если при максимальной температуре изоляция выдерживает значительно меньше циклов, чем при низких температурах, и средний срок службы изоляции менее 200 ч, испытания следует производить при более низкой температуре. Рекомендуемые температуры и время испытаний (на один цикл) для изоляции различных классов нагревостойкости приведены в табл. 107.

Механические воздействия должны выбираться таким образом, чтобы они ненамного превосходили по интенсивности существу-

Таблица 107

Максимально допустимые скорости движения по рельсам с боковым износом головки

Образцы	Время старения в цикле, сут, при температуре, превышающей рабочую на, °С		
	20	40	60
Скрутки эмалированных проводов, непропитанные и пропитанные эластичными лаками средней жесткости; витковая пазовая и междуфазная изоляция на основе эмалированных проводов, пленкокартонов, пленкосинтокартонов, стеклолакотканей, стеклолакочулки и трубки на основе полиолефинов; непрерывная изоляция на основе стеклолакотканей	32	8	2
Скрутки проводов с сильно сшитой эмалевой изоляцией или пропитанные жесткими составами; витковая изоляция на основе проводов со стекловолокнистой изоляцией; пазовая и междуфазная изоляция на основе слюды, слюдяных бумаг, поликарбонатной пленки; непрерывная изоляция лентами на основе слюды и слюдяных бумаг	24	10	4
Макеты изоляции на напряжение 3300, 6600 и 10000 В	50	24	12

ющие в эксплуатации, из расчета, что в каждом цикле изоляция подвергается 1/10 общей суммы воздействий. Для машин низкого напряжения основным механическим воздействием является вибрация; высокого напряжения — удары обмотки о стенки паза и вибрация; для электродвигателей всех напряжений — динамические усилия в лобовых частях обмотки при пусковых токах. Испытательное напряжение выбирают в зависимости от рабочего напряжения и возможных перенапряжений. Обмотки высокого напряжения, помимо нагрева и механических воздействий, должны подвергаться воздействию повышенного напряжения, которое, как и температура, является старящим фактором. При испытании обмоток на рабочее напряжение 6600 В рекомендуется прикладывать напряжение примерно 8500–9000 В частотой 400 Гц в течение 4 сут в каждом цикле испытаний; при меньшей частоте соответственно увеличивают время. По полученным результатам строят графики зависимости среднего срока службы изоляции от температуры (рис. 169). К рекомендациям по экстраполированию полученных результатов в об-

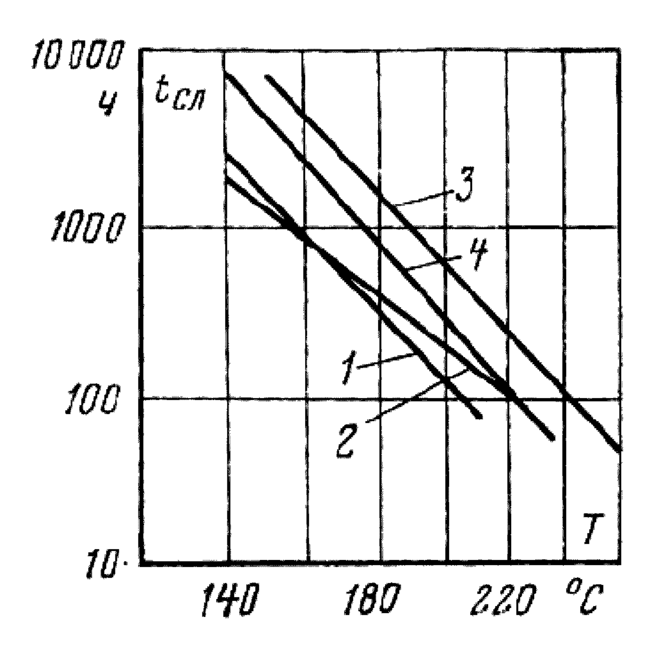


Рис. 169. Средний срок службы $t_{сл}$ проводов, эмалированных поливинилформалевым лаком с пропиткой фенольными лаками в электродвигателях, макетах и скрутках: 1 — испытания макетов электродвигателей (моторетт); 2 — испытания электродвигателей; 3 — испытания скруток проводов (при испытательном напряжении 500 В); 4 — то же при 1000 В

ласть рабочих температур или напряжений нужно относиться весьма критически, и экстраполировать по температурной зависимости можно только в узких пределах (от точки, соответствующей сроку службы не менее 5000 ч). Наиболее достоверные результаты оценки нагревостойкости конструкций с новыми материалами получают при сравнении их с конструкциями, где применены материалы, нагрево- и короностойкость которых определены длительным опытом. Так как срок службы изоляционного материала зависит от конструкции, в которой он применен (нахождение в напряженном состоянии, сочетание с другими материалами и т. п.), и условий эксплуатации, то целесообразно определять нагревостойкость каждой конкретной конструкции при конкретных условиях испытаний. На рис. 170 показано, что одни материалы старятся на воздухе медленнее, чем при герметизации (например, целлюлозные, продукты разложения которых, удаляясь, меньше повреждают материал, чем в герметичной конструкции), другие наоборот. Присутствие влаги в материале также может значительно ускорить его старение (рис. 171).

Нагревостойкость определяется зависимостью срока службы изоляционных конструкций от температуры, поэтому в процессе

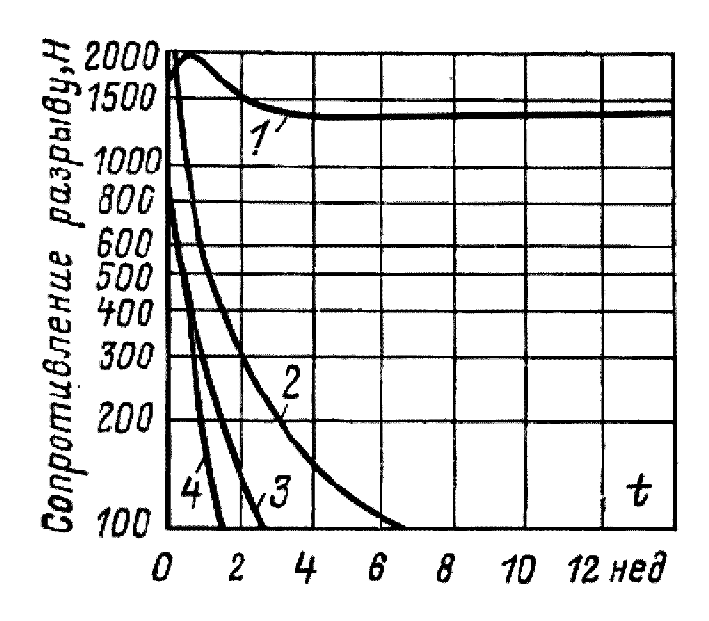


Рис. 170. Старение при 150 °С целлюлозной бумаги и синтетического волокна «орлон» на воздухе и в атмосфере азота: 1 — акрилнитриловое волокно «орлон» в атмосфере азота; 2 — то же на открытом воздухе; 3 — целлюлозная бумага на открытом воздухе; 4 — то же в атмосфере азота

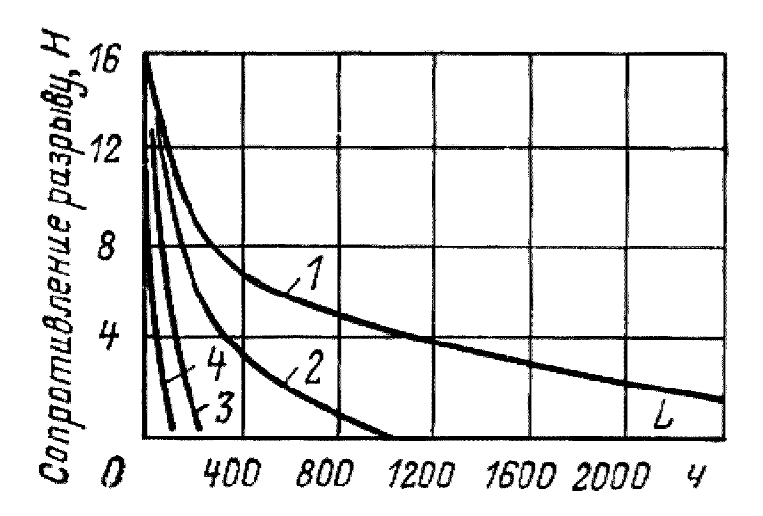


Рис. 171. Влияние влажности на изменение сопротивления разрыву бумаги (старение при 120 °С в масле под азотом). Влажность: 1 — 0,05; 2 — 0,27; 3 — 2,2; 4 — 7,95

испытаний при каждой из температур следует добиться по возможности одинакового воздействия других испытательных факторов: механических воздействий, воздействий влаги и напряжения, т. е. продолжительность теплового старения в циклах при каждой испытательной температуре должна выбираться такой, чтобы выход из строя образцов изоляции при каждой из температур происходил приблизительно за одинаковое число циклов. Так как срок службы зависит не только от температуры, но и от механических и электрических воздействий, которые в ряде случаев могут играть значительную роль, то при изменении их интенсивности могут происходить смещения и изломы графиков зависимости сроков службы от температуры. Эти изломы графиков могут быть следствием изменения физического состояния изоляции от воздействия повышенной температуры (улетучивания пластификатора, размягчения материала) и т. п. Явления резкого излома кривых указывают на то, что расчет линии регрессии не всегда правомерен. Формально такой расчет возможен, т. к. из уравнения Вант-Гоффа–Аррениуса следует, что логарифмы сроков службы являются линейной функцией величины, обратной абсолютной температуре:

$$Y = \lg Y_1 = a + bX, \qquad (6.5)$$

где Y_1 — срок службы; $X = 1/T$; a, b — постоянные.

Для построения линии регрессии определяются постоянные a и b, которые могут быть получены обработкой экспериментальных данных методом наименьших квадратов. Линейность линии регрессии устанавливается с помощью критерия Фишера. Обработка большего количества данных испытаний показала, что в большинстве случаев линейной зависимости $\lg Y = f_1(1/T)$ не наблюдается, при этом расчеты постоянных линий регрессий и доверительных интервалов могут быть недостаточно надежными, а отсюда не всегда правомерна экстраполяция линии регрессии и область рабочих температур и, следовательно, полученные экстраполированные значения температур являются ориентировочными. Однако и при нарушении линейности во многих случаях у испытуемых систем сохраняется тот же наклон графиков зависимости логарифма срока службы от температуры, как для аналогичных по своему химическому составу групп, где эта зависимость оказалась линейной. Поэтому экстраполяция линий регрессии в область базовых сроков службы (получение значений температурных индексов и классов нагревостойкости) может быть правомерной и в случае нелинейности, когда угол наклона («правило градусов») для данной группы материалов сохранен. Во всех случаях угол наклона определяется химическим составом изоляции и процессами, происходящими в ней при тепловом старении. При правильном выборе диагностических факторов и в сравнительно широком диапазоне значений критериев «конечной точки» угол не зависит от них. Так, при проверке влияния уровней критерия конечной точки на наклон графика логарифма срока службы от температуры (табл. 108) для скруток эмалированных проводов двух типов с различным характером старения (ПЭВ-2 и ПЭТВ) установлено, что выбранные значения электрического напряжения, не являющиеся старящими, не изменяют наклона графика. Такие же результаты получены для непрерывной изоляции из микаленты или стеклолакоткани в диапазоне напряженностей электрического поля 1,4–4,3 кВ/мм.

Анализ результатов исследований образцов на срок службы также показал, что медиановое значение срока службы и среднее близки, поэтому приблизительное суждение о нагревостойкости образцов можно иметь после выхода из строя половины их. При испытании конструкций важно выбрать правильный критерий базового срока

Таблица 108

Влияние уровней критерия «конечной точки» на температурный индекс ТИ, линейность и изменение температуры ΔТИ, приводящее к изменению срока службы проводов в 2 раза

Показатель	Испытательное напряжение, В				
	500	750	1000	1500	2000
Провод ПЭВ-2 диаметром 1,56 мм					
ΔТИ, °С	8	8	8	7	7
Линейность	+	+	+	–	–
ТИ, °С	117	113	112	113	112
Провод ПЭТВ-939 диаметром 1,62 мм					
ΔТИ, °С	• • •	8	8	9	9
Линейность	• • •	–	–	+	+
ТИ, °С	• • •	157	154	154	139

службы. Так, даже для близких конструкций нельзя ориентироваться на одинаковый базовый срок службы, когда независимо от габаритов для изоляции машин со всыпными обмотками принят базовый срок службы 20 000 ч. Механические напряжения значительно влияют на срок службы, а в каждом типоразмере машин изоляция подвержена неодинаковым механическим напряжениям (различные диаметры провода и радиусы его изгиба в обмотке). В эксплуатации одинаковая изоляция обмоток разных типоразмеров будет иметь разную долговечность также вследствие различных температурных условий, которые при равной выделявшейся тепловой энергии обусловливаются теплопроводностью обмоток и теплоотдачей с их поверхности. Это же явление будет иметь место при испытании конструкции изоляции на срок службы непосредственно в машинах путем форсирования их нагрева. Геометрия обмоток значительно влияет на срок службы изоляции. В зависимости от назначения и ответственности электрические машины могут иметь различный срок службы. Если для электродвигателей со всыпной обмоткой срок службы изоляции принимается в 20–30 тыс. ч, то изоляция крупных электродвигателей высокого напряжения, турбо- и гидрогенераторов должна работать не менее 150–200 тыс. ч. Так как изоляция высокого напряжения работает при более высоких напряженностях электрического поля и рассчитывается на более длительную экс-

плуатацию (базовый срок службы), чем изоляция низкого напряжения, то обмотки высокого напряжения с микалентной изоляцией на масляно-битумных связующих применяются в машинах с максимальной рабочей температурой не выше 110, а низкого напряжения — не выше 130 °С. Для оценки нагревостойкости конструкций с новыми видами изоляции нужно сравнивать их с аналогичными конструкциями, где применены материалы, нагревостойкость которых определена опытом длительной эксплуатации. Большое влияние на полученные результаты может оказать критерий «конечной точки». В некоторых случаях выбор слишком высокого или необоснованно низкого испытательного напряжения может значительно изменить устанавливаемый срок службы (табл. 108 и рис. 172). Испытательное напряжение должно быть выбрано обоснованно, оно не должно значительно превышать рабочее (а в случае перенапряжений — их уровня) и вместе с тем должно выявлять дефекты в изоляции. Значительное влияние на полученные результаты могут оказать и диагностические факторы, например механические воздействия (рис. 173). Рекомендуется, чтобы механические воздействия не пре-

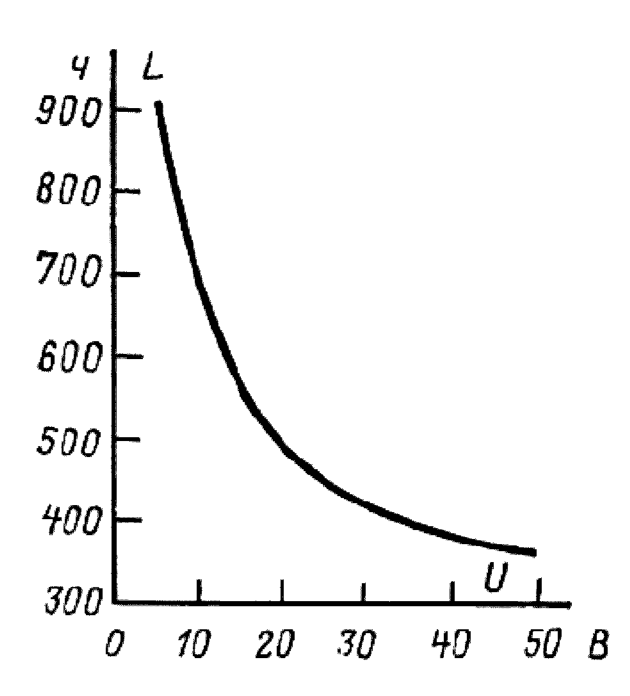


Рис. 172. Средний срок службы витковой изоляции обмотки из провода, эмалированного поливинилформалевым лаком, старящейся при 160 °С и подвергающейся вибрации при ускорении 1 g, в зависимости от напряжения постоянного тока

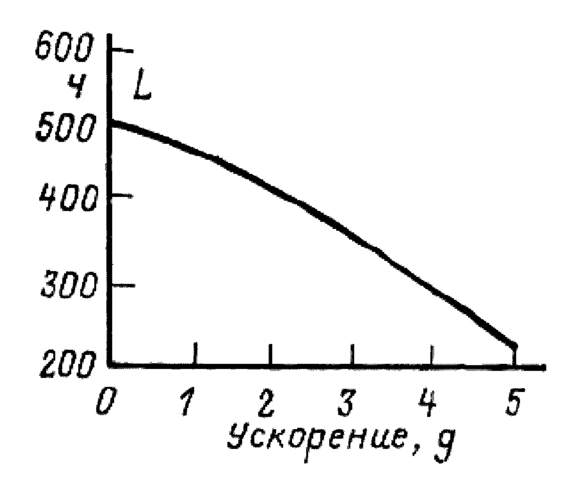


Рис. 173. Средний срок службы катушек из провода с изоляцией, эмалированной поливинилформалевым лаком, старящихся при 160 °С и напряжении 35 В постоянного тока, в зависимости от уровня вибрации

вышали по уровню действующие в эксплуатации; увеличение их частоты дает возможность сократить время испытаний. Следует еще раз отметить, что при всех испытаниях определяют условную нагревостойкость конструкции, зависящую от значений воздействий, приложенных при испытаниях, отличающихся от реальных, которые сложно воспроизвести. Поэтому возможна лишь сравнительная оценка новых конструкций со старыми, свойства которых известны по опыту длительной эксплуатации.

6.3.2. Испытания изоляции неподвижных всыпных обмоток

Наиболее достоверные результаты получаются при испытании изготовленных реальных машин. Испытания в макете проще, но менее достоверны. В цикл испытания электрической машины низкого напряжения со всыпной обмоткой входят: работа на холостом ходу при повышенной температуре, регулируемой ограничением вентиляции, реверсированием (для трехфазных электродвигателей) или частотой пусков–остановок (для однофазных электродвигателей). В синхронных генераторах и машинах постоянного тока температуру при испытании регулируют током возбуждения, частотой пусков–остановок, ограничением вентиляции. В течении цикла работы при повышенных температурах должно быть проведено 25 тыс. реверсов или пусков–остановок асинхронных машин или машин постоянно-

го тока. Синхронные машины подвергают в каждом цикле 10 тыс. реверсов или пусков–остановок. После теплового старения машины выдерживают в камерах при 20±5 °С и относительной влажности воздуха 100 % (конденсация влаги) в течение 48 ч и не более чем через 15 мин после выгрузки машины из камеры влажности включают в работу. При работе испытательная температура должна быть достигнута в самой нагретой точке обмотки. Для этой цели перед началом испытаний на срок службы следует тщательно исследовать температурное поле машины. Нередко вместо испытаний изоляции обмоток в машинах проводят испытания макетов. Коэффициент заполнения паза в макетах должен быть 70–75 % для проводов с эмалевой изоляцией и 65–70 % для проводов с волокнистой изоляцией. Макеты подвергают такой же пропитке, как и узлы машины, изоляцию проверяют перед началом испытаний на срок службы напряжением 2500 В относительно корпуса и между фазами и напряжением 250 В между параллельными проводами. Для теплового старения макеты помещают в предварительно нагретый термостат и, не охлаждая, извлекают из него, т. е. подвергают «тепловому удару». После охлаждения макеты испытывают на вибрационном стенде в течение 1 ч при ускорении 1,5 g с частотой 20–50 Гц (двойная амплитуда 1,9–0,3 мм) и затем увлажняют при 20±5 °С и 100-процентной относительной влажности воздуха. После увлажнения изоляцию макетов непосредственно в камере влажности испытывают напряжением переменного тока, которое должно быть на 30–40 % выше рабочего напряжения, частотой 50 Гц, корпусную в течение 10 мин, витковую — 1 мин. Циклические испытания проводят до выхода из строя всех образцов, после чего результаты испытаний подвергают статической обработке. Срок службы образцов, испытанных в термостатах, вычисляют в часах для каждого значения температуры испытания как суммарное время нагрева во всех циклах за вычетом половины длительности нагрева в цикле, после которого образец вышел из строя. Срок службы изоляции, испытываемой в машине, вычисляют в часах как суммарное время воздействия испытательной температуры во всех циклах испытаний до выхода образцов из строя. После выхода из строя всех образцов рассчитывают средний срок службы для каждой испытательной температуры и строят график его зависимости от температуры.

6.3.3. Испытания макетов шаблонной обмотки

Испытание на срок службы машин большой мощности затруднительно, поэтому применяемые в таких машинах шаблонные обмотки испытывают обычно на макетах. Макет представляет собой устройство с двумя раздвижными пазами. В пазы укладывают в два слоя по высоте предварительно изолированные отрезки катушки обмотки (полукатушки). Пакет проводников изолируют от корпуса и бандажируют. На дно паза и между полукатушками укладывают изоляционные прокладки. За пределами пазов макет до укладки изолируют соответствующим электроизоляционным материалом. Полукатушки укладывают свободно, затем подвижную стенку паза прижимают к ним усилием, обеспечивающим давление примерно 1 МПа, и фиксируют болтами. Пазы макета после фиксации заклинивают. Собранный макет пропитывают лаком или компаундом и покрывают эмалью. Если пропитку катушек обмотки запроектировано производить до их укладки в пазы ротора или статора, это учитывают при изготовлении макетов. Изоляция готовых макетов до начала циклических испытаний должна быть проверена повышенным напряжением переменного тока частотой 50 Гц. Значение испытательного напряжения зависит от рабочего напряжения и типа обмотки. При каждой температуре рекомендуется испытывать не менее 10 макетов. После теплового старения макеты, охлажденные до 20±5 °С, подвергают воздействию механических усилий. Макеты статорной обмотки подвергают вибрации с ускорением 5 g и частотой 50–55 Гц (двойная амплитуда 1–0,8 мм) в течение 30 мин в направлении, перпендикулярном плоскости основания макета, а затем в течение 1 ч — в направлении, перпендикулярном боковым стенкам пазов. Макеты роторной обмотки подвергают вибрации с ускорением 5 g в течение 1,5 ч в направлении, перпендикулярном плоскости их основания. Затем макеты увлажняют в течение 5 сут и испытывают напряжением (табл. 109).

В тех случаях, когда в процессе работы соответствующей электрической машины возможны значительные превышения номинального напряжения (свыше 15 %), испытательное напряжение устанавливают не по номинальному, а по максимальному рабочему напряжению. Напряжение прикладывают поочередно: сначала между проводниками, затем между полукатушками и относительно

Таблица 109

Максимально допустимые скорости движения по рельсам с боковым износом головки

Номинальное напряжение машины, В	Испытательное напряжение, В				
	между проводниками			относительно корпуса и между катушками	
	до старения	в процессе старения		до старения	в процессе старения
		для коллекторных машин	для бесколлекторных машин		
100	200	60	120	1000	400
Свыше 100 до 500	400	60	220	3000	1000
Свыше 500 до 800	500	120	380	4000	1400
Свыше 800 до 1000	500	120	380	5500	1800
Свыше 1000 до 1500	1000	120	500	7500	2500

корпуса. Длительность испытаний изоляции между проводниками 1 мин, между полукатушками и относительно корпуса 10 мин. Испытание следует производить в камере влажности или немедленно после извлечения макета из нее.

6.3.4. Испытания изоляции обмоток высокого напряжения

Обмотки напряжением 3300 В фактически не подвергаются воздействию электрической короны, и поэтому основными воздействиями на них в процессе эксплуатации следует считать тепловые и механические. Поэтому методика испытаний на срок службы изоляции макетов обмоток напряжением 3300 В должна включать в себя тепловое старение (продолжительностью в каждом цикле вдвое больше, чем рекомендуемая для обмоток низкого напряжения, т. к. желательный срок службы машин высокого напряжения значительно больше, чем низкого), воздействие ударов 500 Дж (1000 ударов в каждом цикле), последующее увлажнение 20±2 °С и 98 % относительной влажности воздуха в течение 10 сут и испытание напряжением 1,5 $U_н$. Такие же воздействия должны быть включены в циклические испытания на срок службы обмоток напряжением 6600 В, но после механических воздействий следует включать в циклы испытаний воздействие повышенным напряжением. Оценить новую изоляцию

высокого напряжения можно только путем сравнения ее со старой, опыт эксплуатации, которой достаточно велик, микалентной компаундированной или микафолиевой гильзовой изоляцией. Оба типа изоляции вследствие термопластичности битума или из-за недостаточной полимеризационной способности связующего в микафолии могут значительно вспухать при высоких температурах, что должно сильно исказить результаты испытаний. Поэтому следует ограничить максимальную температуру испытаний эталонной миканитовой изоляции 160–170 °С и старить образцы в зажатом состоянии в макетах пазов. Рекомендуется начинать испытания постепенным ступенчатым нагревом 105 °С в течение 10 сут, 120 °С — 10 сут и затем доводить до испытательной температуры для снижения термопластичности связующего и уменьшения степени вспухания изоляции. Но и при этом температура размягчения битума может повыситься не более чем на 10 °С, поэтому вспухание изоляции не исключается. Создана методика определения класса нагревостойкости обмоток высокого напряжения, при которой в циклы испытаний включено, помимо воздействий механических и влаги, длительное приложение напряжения 9 кВ (напряженность электрического поля 3,5–4,5 кВ/мм). Макеты для испытаний представляют собой прямую часть катушки, намотанной из прямоугольного изолированного провода, опрессованную согласно технологическому процессу и изолированную. За базовый срок службы эталонной микалентной компаундированной изоляции приняты 100 тыс. ч при 105 °С. Продолжительность старения в цикле при каждой из испытательных температур выбирают таким образом, чтобы при каждой температуре образцы выходили из строя в среднем за 10 циклов. Сроки службы микалентной изоляции на напряжение 6600 В велики [за 500 сут (120 тыс. ч) при 150 °С пробивное напряжение снизилось на 50 %]. Для этой изоляции приняты температуры старения 150, 170 и 190 °С и соответственно продолжительность старения в цикле 50, 20 и 10 сут. Так как новые типы термореактивной изоляции, например «монолит-3», более нагревостойки, то для них предусмотрено старение при четырех температурах: 150, 170, 190 и 210 °С с продолжительностью 100, 50, 20 и 10 сут соответственно. В каждом цикле после старения образцы подвергают диагностическим воздействиям. Испытания производят до полного выхода из строя всех образцов при воздействии диагно-

стического фактора — длительно приложенного напряжения 9 кВ частотой 400 Гц или контрольного напряжения — 10 кВ частотой 50 Гц в течение 1 мин после увлажнения в течение 5 сут. За 10 циклов испытаний образцы подвергают знакопеременным изгибам в общей сумме 540 тыс. при деформации 5×10^{-4} отн. ед., т. е. в каждом цикле по 54 тыс. изгибов. Исходя из анализа данных испытаний на срок службы под воздействием электрического напряжения установлено, что испытания при 400 Гц и 9 кВ в течение 1000 ч приблизительно должны имитировать воздействие на изоляцию фазного напряжения (для $U_л$=6600 В) 3400 В в течение 100 тыс. ч, поэтому в каждый цикл введено воздействие такого напряжения в течение 4 сут. Увлажнение обмотки в каждом цикле проводят при 20–25 °С и относительной влажности 95–98 %. Получены линейные зависимости логарифма срока службы от температуры для микалентной компаундированной изоляции и изоляции «монолит-3» с приблизительно одинаковым углом наклона, полный выход из строя образцов при каждой из испытательных температур происходил за 10–13 циклов. Испытания показали, что при базовом сроке службы обмоток низкого напряжения 30 тыс. ч микалентная компаундированная изоляция может работать при температуре класса нагревостойкости В, а «монолит-3» — при температуре класса нагревостойкости F, а при базовом сроке службы обмоток высокого напряжения 100 тыс. ч микалентная изоляция может работать при температуре класса нагревостойкости А, а «монолит-3» — класса В. Как уже указывалось выше, при таких испытаниях можно получить лишь сравнительную оценку систем изоляции при воздействии только одного старящего фактора, что явно недостаточно. Поэтому в настоящее время разрабатывают новые документы по классификации систем изоляции, базирующиеся на учете нескольких эксплуатационных воздействий, различных для разного типа электрических машин, а также методы кодификации и классификации систем изоляции, которые базируются на оценке не только нагревостойкости, но и стойкости к комбинированным эксплуатационным воздействиям. Кодификация основывается на данных о стойкости систем изоляции к комбинированным воздействиям нескольких факторов (тепловых, электрических, механических, окружающей среды) при определенных условиях работы. Оценка систем изоляции должна основываться на эмпирических

данных — сроке службы при эксплуатации или на функциональных испытаниях. Стандартный кодификационный тип состоит из семизначного номера, где каждый символ характеризует кокое-либо воздействие (E — электрическое, T — тепловое, M — механическое, A — окружающей среды, R — дополнительных факторов, Q — работы оборудования, P — конструкции системы изоляции), уровень которого показывается цифрой от 0 до 9. В конкретном типе оборудования учет всех перечисленных факторов не обязателен. Среди девяти цифр, характеризующих уровень данного воздействия, 0 означает «не имеет»; при неопределенном, но имеющемся воздействии ставится значок X. Кодификационная система полезна для классификации, но для того чтобы работы по классификации были успешными, необходимо усовершенствование функциональных испытаний.

оГлаВление

Список сокращений 3
Введение 4

1. ТребоВания к изоляции 6
1.1. Воздействия на изоляцию в процессе изготовления и эксплуатации электрических машин и их влияние на эксплуатационную надежность 9
1.1.1. Воздействия в процессе изготовления и монтажа обмотки...... 13
1.1.2. Воздействия в процессе эксплуатации 16
1.1.3. Воздействие влажности 17
1.1.4. Тепловое старение изоляции................................ 18
1.2. Требования к электроизоляционным материалам................. 32

2. СПецифичеСкие меТоды оценки СВойСТВ маТериалоВ и СиСТем изоляции 52
2.1. Оценка технологических свойств материалов и проводов 52
2.1.1. Оценка гибких композиционных материалов для пазовой изоляции...................................... 52
2.1.2. Оценка ленточных материалов 59
2.1.3. Оценка листовых материалов на термореактивных связующих 63
2.1.4. Оценка обмоточных проводов 63
2.1.5. Новые направления в разработке эмалированных проводов 67
2.1.6. Оценка изоляционных трубок и выводных проводов............ 72
2.1.7. Испытания пропиточных составов 77
2.2. Методы оценки эксплуатационных свойств электроизоляционных материалов 85
2.2.1. Оценка нагревостойкости электроизоляционных материалов 86
2.2.2. Определение относительной стойкости изоляционных материалов к воздействию поверхностных разрядов 102
2.2.3. Определение трекингостойкости электроизоляционных материалов 104

3. ЭлекТроизоляционные маТериалы
и ПроВода для ЭлекТричеСких машин 108
3.1. Природа электроизоляционных материалов 108
3.2. Классификация электроизоляционных материалов.............. 109
3.3. Свойства электроизоляционных материалов 116
3.4. Обмоточные провода 124
3.5. Электроизоляционные пропиточные материалы................. 144
3.6. Покрывные лаки и эмали 166
3.7. Совместимость эмалированных проводов с пропиточными составами и покрывными эмалями 178
3.8. Лакоткани и стеклолакоткани 189
3.9. Материалы на основе слюды и слюдяных бумаг.................. 197
3.9.1. Слюдяные материалы 203
3.9.2. Материалы на основе слюдяных бумаг 212
3.10. Слюдопластовые композиционные материалы 221
3.11. Синтетические пленки и ленты 222
3.12. Нагревостойкие бумаги и картоны 228
3.13. Композиционные материалы на основе синтетических пленок 234
3.14. Совместимость гибких электроизоляционных материалов с пропиточными составами 237
3.15. Гибкие электроизоляционные трубки.......................... 237
3.16. Выводные провода 245
3.17. Стекловолокнистые бандажные ленты 249
3.18. Слоистые пластики, стеклопластики и пластмассы 250
3.19. Материалы, выполняющие вспомогательные функции 257

4. конСТрУкции изоляции ЭлекТричеСких машин 261
4.1. Основные принципы конструирования изоляции обмоток 262
4.2. Конструкции изоляции обмоток машин общего назначения.. 276
4.2.1. Изоляция электродвигателей малой мощности (5–600 Вт) на напряжение до 660 В 276
4.2.2. Изоляция статорных обмоток асинхронных двигателей и синхронных генераторов мощностью 0,6–100 кВт на напряжение до 660 В 280
4.2.3. Изоляция обмоток статоров асинхронных двигателей и синхронных генераторов мощностью выше 100 кВт на напряжение до 660 В 286
4.2.4. Изоляция статорных обмоток асинхронных двигателей и синхронных генераторов мощностью до 100 кВт на напряжение 3300 и 6600 В.............................. 301

4.2.5. Изоляция роторных обмоток асинхронных двигателей 335
4.2.6. Изоляция обмоток роторов синхронных машин 343
4.2.7. Изоляция обмоток якорей машин постоянного тока 350
4.2.8. Изоляция обмоток главных и дополнительных полюсов машин постоянного тока 359
4.2.9. Заделка (оклетневка) выводных концов 361

5. ТехнолоГия изолироВания ЭлекТричеСких машин 365
5.1. Изолирование обмоток 365
5.1.1. Катушечные обмотки для полуоткрытого паза 365
5.1.2. Изготовление катушек с непрерывной изоляцией 365
5.1.3 Изолирование катушек с «мягкой» и «твердой» гильзой......... 367
5.1.4. Изготовление стержней роторов асинхронных двигателей.. 370
5.1.5. Изготовление полюсных катушек синхронных генераторов... 372
5.2. Изолирование элементов конструкций 374
5.2.1. Изолирование сердечников полюсов 374
5.2.2. Изготовление узлов контактных колец 375
5.2.3. Изготовление коллекторных манжет (конусов)............... 377
5.2.4. Изготовление коллекторов 379
5.2.5. Изготовление коллекторов с применением пластмассы..... 383
5.2.6. Наложение стекловолокнистых бандажей 386
5.2.7. Изолирование магнитопроводов 387
5.3. Технология пропитки и сушки 387
5.4. Компаундирование обмоток 406

6. конТроль и иСПыТания изоляции обмоТок и конТроль ТехнолоГичеСких ПроцеССоВ 417
6.1. Испытания изоляции в процессе изготовления электрической машины 417
6.2. Испытания на стойкость к воздействию окружающей среды 435
6.3. Испытания на длительность срока службы 438
6.3.1. Общие положения... 438
6.3.2. Испытания изоляции неподвижных всыпных обмоток......... 446
6.3.3. Испытания макетов шаблонной обмотки.................... 448
6.3.4. Испытания изоляции обмоток высокого напряжения......... 449